

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Institut dopravy

Využití rekuperace při jízdě vlaku

Use of Recuperation During Train Movement

Student:

Luboš Mikula

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Jaromír Široký, Ph.D.

Zadání bakalářské práce

Student:

Luboš Mikula

Studijní program:

B2341 Strojírenství

Studijní obor:

2301R003 Dopravní technika a technologie

Téma:

Využití rekuperace při jízdě vlaku
Use of Recuperation During Train Movement

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

Cílem práce je posouzení využití rekuperace energie při brzdění vlaku pro snížení energetické náročnosti železniční dopravy.

Osnova práce:

1. Analýza pohybu vlaku z energetického hlediska.
2. Posouzení možností využití rekuperace energie při brzdění hnacích vozidel v různých provozních režimech (traťový výkon, posun).
3. Návrh strategií jízdy vlaku z hlediska využití možností rekuperace.
4. Výpočtové ověření úspory energie při rekuperaci pro navržené strategie.
5. Praktické ověření možností úspory energie při použití rekuperace.
6. Provozně technické zhodnocení řešení.

Seznam doporučené odborné literatury:

Podklady provozovatele dráhy

Podklady provozovatele dopravy

ANTONICKÝ, Stanislav. *Provoz hnacích vozidel*. Bratislava: Alfa. 1987. 423 s.

FMD. *Předpis V7 Trakční výpočty (včetně příloh)*. Praha. FMD. 1982.

SŽDC. *Prohlášení o dráze celostátní a regionální*. On line. Dostupné z:

<https://www.szdc.cz/soubory/prohlaseni-o-draze/2019/szdc-prohlaseni-o-draze-2019-c-r-3-zmena.pdf>

ŠIROKÝ, Jaromír. *Mechanika v dopravě II: příklady*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2006. ISBN 80-248-1252-5.

ŠIROKÝ, Jaromír. *Mechanika v dopravě I: kolejová vozidla*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2004. ISBN 80-248-0536-7.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jaromír Široký, Ph.D.**

Datum zadání: 21.12.2018

Datum odevzdání: 20.05.2019



doc. Ing. Aleš Slíva, Ph.D.
vedoucí katedry




prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne 20. května 2019


.....
Podpis studenta

Prohlašuji, že:

- jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- беру на ве́домі́, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užít tuto závěrečnou bakalářskou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této bakalářské práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- беру на ве́домі́, že - podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů - že tato bakalářskou práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce, a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 20. května 2019.


.....
Podpis autora práce

Jméno a příjmení autora práce: Luboš Mikula

Adresa trvalého pobytu autora práce: Engelmullerova 4, 702 00 Ostrava

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

MIKULA, L. Využití rekuperace při jízdě vlaku: bakalářská práce. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Institut dopravy, 2019, 47 s. Vedoucí práce: Široký, J.

Bakalářská práce se zabývá využitím rekuperačního brzdění u kolejových vozidel. V této práci navrhuji řešení stále se zvyšujících nároků na úsporu energie a také pro zvýšení konkurenceschopnosti drážní dopravy. V úvodní části stanovím základní veličiny určující množství spotřebované energie. Poté analyzuji jednotlivé provozní podmínky, při kterých je možné rekuperaci využívat. Z těchto získaných informací následně navrhnu jízdní strategie, s největším přínosem rekuperačního efektu. U těchto strategií poté výpočtem ověřím možné úspory energie v reálném provozu.

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

MIKULA, L. Use of Recuperation During Train Movement: Bachelor Thesis. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, The Institute of Transport, 2019, 47 s. Thesis head: Široký, J.

Bachelors work deals with the usage of energy recuperation during rail vehicles braking. I will suggest a method how to solve the rising demands on energy consumption and the requirement to increase the competitiveness of railway transportation. At first, I determine base quantities determining the amount of consumed energy. After that, I analyse different operating conditions with possible usage of recuperation effect. From this information then creates drive strategies with the highest recuperation effect. These strategies are then verified with calculations.

Obsah

Seznam zkratk a symbolů.....	6
Úvod.....	8
1. Analýza pohybu vlaku z energetického hlediska.....	9
1.1. Síly působící na kolejová vozidla	9
1.2. Pohybová rovnice kolejových vozidel	13
1.3. Spotřeba energie vozidel	14
2. Posouzení možnosti rekuperace energie při brzdění hnacích vozidel v různých provozních podmínkách (traťový výkon, posun).....	17
2.1. Technická základna	17
2.2. Možnosti rekuperace.....	21
2.3. Rekuperace při posunu	24
2.4. Rekuperace při traťovém výkonu	25
3. Návrh strategií jízdy vlaku z hlediska využití množství rekuperace	25
4. Výpočtové ověření úspory energie při rekuperaci pro navržené strategie	31
5. Praktické ověření úspory energie při použití rekuperace	35
6. Provozně technické zhodnocení řešení	41
Závěr	45
Seznam použité literatury	46

Seznam zkratk a symbolů

O_v – vozidlový odpor [N]	O_{tun} – odpor tunelu [N]
O_f – odpor valení [N]	s_r – redukovaný sklon [‰]
O_v – odpor čepového tření [N]	s – sklon trati [‰]
O_{vz} – odpor prostředí [N]	l – délka trati [m]
a – koeficient a [1]	$s_{obl\ k}$ – sklon k-tého oblouku [‰]
b – koeficient b [1]	$l_{obl\ k}$ – délka k-tého oblouku [m]
c – koeficient c [1]	$s_{tun\ n}$ – sklon n-tého tunelu [‰]
V – rychlost [km/h]	$l_{tun\ n}$ – délka n-tého tunelu [m]
v – rychlost [m/s]	F – výsledná síla působící na vozidlo [N]
O_t – traťový odpor [N]	F_o – tažná síla na obvodu kol [N]
O_s – odpor sklonu [N]	F_B – síla brzdná [N]
O_{obl} – odpor oblouku [N]	O_z – odpor ze zrychlení [N]
G_L – tíha lokomotivy [N]	E_{TV} – energie potřebná k napájení tažených vozidel [j/s]
o_L – koeficient odporu lokomotivy [1]	E_z – energie pokrývající další ztráty [j/s]
G_L – tíha tažených vozidel [N]	E_{1TM} – energie dodaná jednomu TM v určeném časovém úseku [kW/s]
o_L – koeficient odporu tažených vozidel [1]	U_{1TM} – napětí na jednom TM v určeném časovém úseku [V]
t – čas [s]	I_{1TM} – střední hodnota proudu v určeném časovém úseku [A]
E_C – celková energie dodaná hnacímu vozidlu [j/s]	κ – koeficient spotřeby pomocných zařízení (0,02 pro stejnosměrné napájení, 0,025 – 0,03 střídavé napájení) [1]
E_{TR} – energie potřebná k pokrytí spotřeby trakčních motorů [j/s]	φ – měrná spotřeba pro napájení [1]
E_{PZ} – energie potřebná k pokrytí spotřeby pomocných zařízení [j/s]	

I – proud [A]

P – výkon [W]

U – napětí [V]

ΔU – úbytek napětí [V]

R – odpor [Ω]

E_k – kinetická energie [J]

E_p – polohová energie [J]

E_d – energie dodaná, nebo vrácená do TS
[J]

A – práce vykonaná odpory proti pohybu
[J]

m – hmotnost vozidla [kg]

J_0 – moment setrvačnosti rotujících hmot
[kg·m²]

ω – úhlová rychlost rotujících hmot [s⁻¹]

ΔE_k – změna kinetické energie [J]

O_C – odporová síla působící na vozidlo [N]

Δh – změna výšky [m]

Úvod

Tématem této bakalářské práce je využití rekuperace a její přínosy pro kolejovou dopravu. Rekuperace je proces, během kterého se kinetická nebo polohová energie vozidla při brzdění přeměňuje v energii elektrickou, která se dále využívá. Díky opětovnému použití energie může rekuperace snížit energetické nároky na provoz vozidel.

V práci nejprve zhodnotím pohyb vlaku z hlediska spotřebované energie. Uvedu základní síly působící na vozidlo a vztahy pro jejich výpočet. Popíšu také možnosti výpočtu spotřebované energie pro různé trakční systémy vozidel. Poté se budu zabývat především možnostmi využití rekuperace v různých podmínkách provozu, jako je traťový výkon a posun. Z těchto vstupních údajů stanovím strategie jízdy pro různé stavy vozidel, u kterých následně vypočítám teoretickou úsporu energie pro zvolený vlak. Tuto úsporu ověřím na základě údajů získaných z reálné jízdy vlaku po úseku trati.

Cílem práce bude zkoumat přínosnost rekuperace v železniční dopravě. A zjistit účinnost rekuperace pro jednotlivé strategie jízdy.

1. Analýza pohybu vlaku z energetického hlediska

Pohyb vlaku lze popsat jako pohyb hmotného bodu s jedním stupněm volnosti, na který působí pouze vnější kolineární síly ve směru pohybu a síly tíhové. Síly působící na vozidlo jsou statické, stanovené nebo vypočtené. [1] Při analýze pohybu vlaku se vychází z rovnice zákona o zachování energie a odvozené rovnice pohybu vozidel.

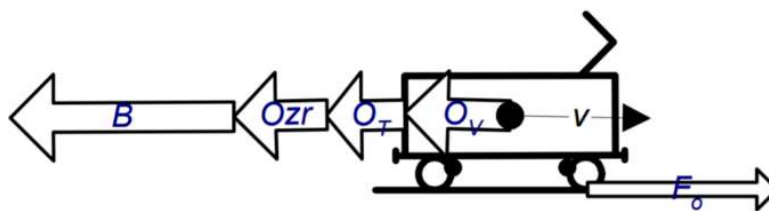
1.1. Síly působící na kolejová vozidla

Při popisu sil působících na kolejová vozidla v pohybu vycházíme z platnosti zjednodušujících předpokladů, uvedených v úvodu této kapitoly. Síly působící na vozidla lze poté rozdělit do tří skupin:

Síly tažné – působí ve směru pohybu vozidla

Síly brzdné – působí proti směru pohybu vozidla

Síly odporové – působí proti směru pohybu vozidla



Obrázek č. 1 Síly působící na kolejová vozidla [1]

Tažná síla vzniká primárně ve zdroji mechanické energie například v elektromotoru, spalovacím motoru nebo ve válci parního stroje. Tato prvotně vzniklá síla je poté pomocí převodů přenesena na kolo, kde působí v místě styku kola a kolejnice. Síla F_0 musí být vždy menší než adhezní síla – maximální síla, kterou je možno ve styku kolo – kolejnice přenést, aniž by došlo k prokluzu. Tažná síla, působící na tažená vozidla, účinkuje v místě spojení vozidel na spřáhle. Pro vytvoření tažné síly je potřeba pohonu hnacího vozidla (dále HV) dodat energii. Z tohoto pohledu se hnací vozidla dělí na ty s trakcí závislou, polozávislou a nezávislou na trakčním vedení.

Během působení tažné síly na vozidlo vzniká zrychlení, během jehož působení se zvyšuje rychlost vozidla a jeho kinetická energie. Část kinetické energie lze získat zpět procesem zvaným rekuperace.

Brzdná síla vzniká v brzdách a slouží ke zpomalení, úplnému zastavení, případně zajištění vozidla proti samovolnému uvedení do pohybu. Podle místa působení se rozlišují

brzdy adhezní, brzdná síla působí v místě styku kolo – kolejnice a brzdy neadhezní – brzdná síla má vliv přímo na kolejnici. Brzdná síla umožňuje vozidlu zrychlení a_b , působící proti směru pohybu vozidla. Vlivem zrychlení se snižuje rychlost a zrychlení a_b , působící proti směru pohybu vozidla. Účinkem tohoto zrychlení se snižuje rychlost a kinetická energie vozidla. Tato energie může být během brzdění přeměněna na teplo, nebo pomocí dynamických brzd převedena zpět na energii elektrickou.

Odporová síla neboli odpory proti pohybu vozidla, vznikají v důsledku nedokonalosti materiálů, trati nebo vozidla. Odporová síla má vliv obvykle proti směru pohybu v místech působení jednotlivých odporů. Celkový odpor lze vypočítat jako sumu dílčích odporů, tedy odporů vozidlových a traťových.

Vozidlové odpory vznikají přímo jízdou vozidla a jsou závislé na mnoha parametrech. Celkový odpor vozidla lze spočítat jako sumu odporu valivého, odporu zrychlení a odporu vzduchu.

$$O_v = O_f + O_l + O_{vz} \quad (1.)$$

O_v – vozidlový odpor [N]

O_f – odpor valení [N]

O_l – odpor čepového tření [N]

O_{vz} – odpor prostředí [N]

Při praktických měřeních bylo zjištěno že dílčí odpory závisí především na rychlosti vozidla a vozidlový odpor byl popsán pomocí následující rovnice a koeficientů a , b , c .

$$O_v = a + b \cdot V + c \cdot V^2 \quad (2.)$$

O_v – vozidlový odpor [N]

a – koeficient a [1]

b – koeficient b [1]

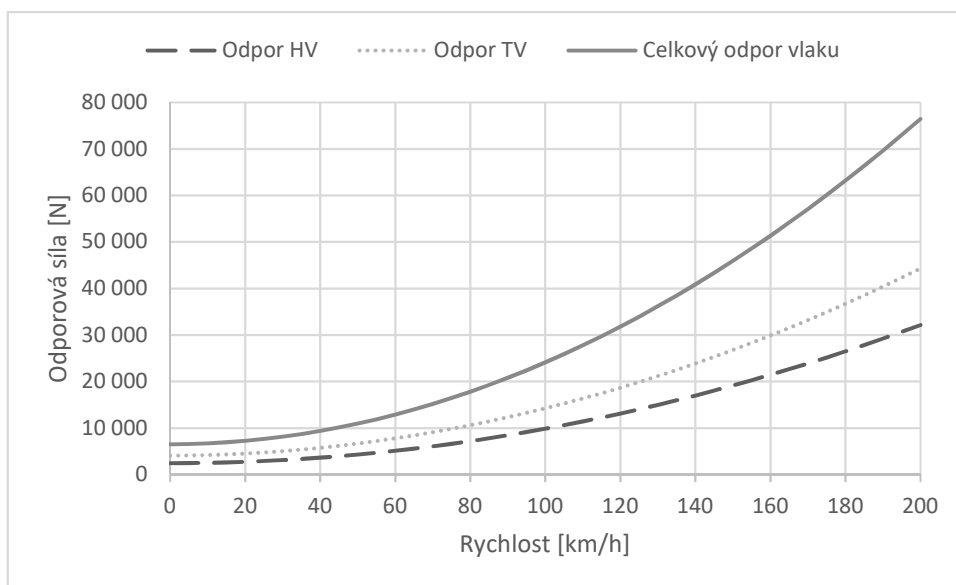
c – koeficient c [1]

V – rychlost [km/h]

Hodnoty koeficientů byly stanoveny z jízdních zkoušek pro různé typy vozidel. Ta jsou na základě uspořádání pojezdu rozděleny do skupin, s přibližnými hodnotami koeficientů pro každou skupinu. Jako příklad uvádím lokomotivu řady 380 s upořádáním pojezdu Bo' Bo' o hmotnosti 89 t a šesti připojenými osobními čtyřnápravovými vozy o celkové hmotnosti 307 t. Hodnoty koeficientů jsou uvedeny v tabulce č. 1 a průběhy vozidlových odporů v závislosti na rychlosti na obrázku č. 2.

aHV	bHV	cHV	aTV	bTV	cTV
2,8	0	0,00085	1,35	0,0008	0,00033

Tabulka č. 1 Hodnoty koeficientů [1]



Obrázek č. 2 Průběh vozidlových odporů

Traťové odpory závisí na stavební úpravě trati, hmotnosti vozidla a jeho délce. Celkový odpor trati lze opět vypočítat jako sumu dílčích odporů, jimiž jsou odpor sklonu trati, odpor oblouku a odpor tunelu.

$$O_t = O_s + O_{obl} + O_{tun} \quad (3.)$$

O_t – traťový odpor [N]

O_s – odpor sklonu [N]

O_{obl} – odpor oblouku [N]

O_{tun} – odpor tunelu [N]

Pro zjednodušení výpočtů se provádí redukce sklonu. Při tomto procesu se připočítávají přídatné sklony oblouků a tunelů ke sklonu trati.

$$s_r = \frac{s \cdot l + \sum s_{obl\ k} \cdot l_{obl\ k} + \sum s_{tun\ n} \cdot l_{tun\ n}}{l} \quad (4.)$$

s_r – redukovaný sklon [‰]

s – sklon trati [‰]

l – délka trati [m]

$s_{obl\ k}$ – sklon k-tého oblouku [‰]

$l_{obl\ k}$ – délka k-tého oblouku [m]

$s_{tun\ n}$ – sklon n-tého tunelu [‰]

$l_{tun\ n}$ – délka n-tého tunelu [m]

Mezi důležité ukazatele patří také rozhodné stoupání a rozhodný spád. **Rozhodné stoupání** značí nejvyšší kladnou hodnotu redukovaného sklonu na traťovém úseku. **Rozhodný spád** potom nejvyšší zápornou hodnotu redukovaného sklonu na sledovaném traťovém úseku.

1.2. Pohybová rovnice kolejových vozidel

Při popisu pohybu vozidel se předpokládá, že celková síla působící na vozidlo se rovná sumě dílčích sil, a to síly tažné, síly brzdné a síly odporů.

$$F = F_0 + F_B + O_t + O_v + O_z \quad (5.)$$

F – výsledná síla působící na vozidlo [N]

F_0 – tažná síla na obvodu kol [N]

F_B – síla brzdná [N]

O_t – traťový odpor [N]

O_v – vozidlový odpor [N]

O_z – odpor ze zrychlení [N]

V praxi nikdy nepůsobí zároveň síla tažná a síla brzdná, proto se při výpočtu vždy hodnota jedné z nich rovná nule. Při rozjezdu vozidla je brzdná síla rovna nule a suma sil působících na vozidlo musí být větší než nula. Z dynamického hlediska se jedná o jízdu tahem.

Naopak při brzdění vozidla se tažná síla rovná nule a suma sil působících na vozidlo musí být menší než nula.

Posledním případem je situace kdy na vozidlo nepůsobí ani síla tažná ani síla brzdná. Suma sil působících na vozidlo se rovná síle odporové. V tomto stavu může vozidlo zpomalovat v důsledku odporů, nebo zrychlovat v důsledku kladného odporu sklonu. Z dynamického hlediska se jedná o jízdu výběhem. Po dosazení vzorců pro výpočet jednotlivých odporů a následné úpravě, vznikne takzvaná **základní rovnice pohybu kolejových vozidel**.

$$F_0 - G_L \cdot o_L - G_T \cdot o_T - (G_L + G_T) \cdot s$$

$$= 1000 \cdot (G_L + G_T) \cdot \frac{1 + \rho}{g} \cdot \frac{dv}{dt} \quad (6.)$$

F_0 – tažná síla [N]

G_L – tíha lokomotivy [N]

o_L – součinitel odporu lokomotivy [1]

G_T – tíha tažených vozidel [N]

o_T – koeficient odporu tažených vozidel [1]

s – sklon trati [‰]

v – rychlost vlaku [m/s]

t – čas [s]

1.3. Spotřeba energie vozidel

Všechny druhy vozidel, jak hnacích, tažených nebo speciálních, potřebují ke svému provozu energii. Zdroj této energie je v závislosti na trakci umístěn přímo ve vozidle – vozidla nezávislé trakce, nebo se přenáší pomocí trakční soustavy (dále TS) z elektrické napájecí sítě – vozidla závislé trakce. V závislosti na trakci HV se liší výpočet pro spotřebu energie vlaku. V obou případech je základem tachogram vlaku a charakteristika hnacího vozidla, dále HV.

Energii dodanou hnacímu **vozidlu závislé trakce** lze vypočítat jako součet dílčích složek energií podle následující rovnice:

$$E_C = E_{TR} + E_{PZ} + E_{TV} + E_Z \quad (7.)[1]$$

E_C – celková energie dodaná hnacímu vozidlu [kW]

E_{TR} – energie potřebná k pokrytí spotřeby trakčních motorů [kW]

E_{PZ} – energie potřebná k pokrytí spotřeby pomocných zařízení [kW]

E_{TV} – energie potřebná k napájení tažených vozidel [kW]

E_Z – energie pokrývající další ztráty [kW]

Rovnice pro výpočet jednotlivých složek dodané energie se liší v závislosti na TS. Při výpočtu spotřeby energie vlaku na **stejnosměrné TS** je napájecí napětí U_N konstantní, a lze předpokládat že se všechny trakční motory (dále TM) otáčejí stejnou úhlovou rychlostí. Napětí na jednom motoru se rovná podílu napájecího napětí U_N a počtu motorů n . Energii dodanou jednomu TM lze zjistit pomocí rovnice pro výpočet spotřeby elektrického zařízení.

$$E_{1TM} = \sum U_{1TM} \cdot I_{1TM} \cdot t \quad (8.)[1]$$

E_{1TM} – energie dodaná jednomu TM v určeném časovém úseku [kW/s]

U_{1TM} – napětí na jenom TM v určeném časovém úseku [kV]

I_{1TM} – střední hodnota proudu v určeném časovém úseku [A]

t – doba trvání určeného časového úseku [s]

V závislosti na zapojení TM a zvoleném regulačním stupni se mění hodnota U_{1TM} . Střední hodnotu proudu I_{1T} lze zjistit ze spotřební charakteristiky HV.

Energii pro pomocná zařízení vlak spotřebovává za jízdy i stání. Je nutná pro provoz vozidel. Při potřebě znát přesnou hodnotu, se příkon rovná sumě příkonů jednotlivých zařízení jako jsou ventilátory, kompresory, čerpadla atd. Z důvodu náročnosti takového výpočtu byly zavedeny empirické vztahy závislosti E_{pZ} na E_{TR} .

$$E_{pZ} = \kappa \cdot E_{TR} \quad (9.)[1]$$

E_{pZ} – energie potřebná pro pohon pomocných zařízení [kW]

κ – koeficient spotřeby pomocných zařízení (0,02 pro stejnosměrné napájení; 0,025 – 0,03 střídavé napájení) [1]

E_{TR} – energie potřebná na pokrytí spotřeby TM [kW]

Energii pro napájení tažených vozidel spotřebovává vlak za jízdy i stání. Může ji využívat například pro vytápění, osvětlení nebo nabíjení akumulátorů. Je opět obtížné přesně vypočítat tuto složku energie, proto platí koeficienty měrné spotřeby vzhledem k tíze vozidel a době napájení.

$$E_{TV} = \varphi \cdot G_V \cdot t \quad (10.)[1]$$

E_{PZ} – energie potřebná pro napájení tažených vozidel [kW]

φ – měrná spotřeba pro napájení [1]

G_V – tíha tažených vozidel [N]

t – doba napájení [s]

Energie pokrývající další ztráty představuje energii spotřebovanou v dalších částech trakčních zařízení. V případě stejnosměrného napájecího systému s odporovou regulací je považována za nulovou. Jako příklad pro výpočet **energie na pokrytí dalších ztrát** uvádím hnací vozidlo vybavené trakčním transformátorem a usměrňovači. Energii spotřebovanou pro pokrytí dalších ztrát vyjadřuje celková účinnost prvků regulace, tedy účinnost transformátoru, účinnost odporů a vliv jalového proudu.

$$\eta_C = \frac{\cos \varphi}{\eta_{TR} \cdot \eta_U} \quad (11.)[1]$$

η_C – celková účinnost [1]

$\cos \varphi$ – účinník (slouží pro popis vlivu jalového proudu) [1]

η_{TR} – účinnost transformátoru [1]

η_U – účinnost usměrňovačů [1]

Trakční energie je vozidlu dodávána na základě smlouvy o dodávkách trakční energie, uzavřené mezi dopravcem a provozovatelem dráhy. Smlouva stanovuje mimo jiné povinnosti dopravce, který je zavázán provozovateli hradit cenu za službu dodávek. Ta v sobě zahrnuje cenu za trakční elektrickou energii a cenu za zajišťování dodávek energie na sběrač hnacího vozidla dopravce. A povinnosti provozovatele, kterými jsou nákup energie ve prospěch dopravce v předpokládaném objemu a zajištění dodávek energie na sběrač hnacího vozidla.

V současné době je spotřeba elektrické energie stanovována metodikou **hybridního modelu**, umožňující přesnější stanovení spotřeby vozidla. Tato metodika kombinuje

výpočet trakční energie, spotřebované hnacími vozidly, vybavenými systémem pro měření trakční elektrické energie (dále EMS) a vozidel tímto systémem nevybavené.

Rekuperace se do celkové spotřeby započítává pouze v případech, kdy je hnací vozidlo vybaveno systémem EMS. Naměřené množství poté ocenění jednotkovou cenou, která se shoduje s režimem kdy vozidlo energii odebírá.

2. Posouzení možnosti rekuperace energie při brzdění hnacích vozidel v různých provozních podmínkách (traťový výkon, posun).

Jak bylo napsáno dříve v této práci, rekuperace je děj, při kterém dochází k přeměně kinetické nebo polohové energie na energii elektrickou, kterou je možné dále využívat. Důvody pro rekuperaci jsou úspora energie a menší opotřebení brzdových zdrží nebo brzdových odporníků.

2.1. Technická základna

Pro použití rekuperace musí být nejprve splněny požadavky na TS a HV. Síť společnosti Správa železniční dopravní cesty (dále SŽDC) umožňuje rekuperaci vozidlům, splňujícím evropské normy v úsecích označených příslušnými návěstidly, [13] a to jak na úsecích DC 3 kV, tak AC 25 kV. Další podmínky pro provozování rekuperace určují normy ČSN EN 50388 a ČSN EN 50163.

Zdroj: normy ČSN EN 50388 a ČSN EN 50163 [13], [14].

„Vlaky nesmí dále používat svoje rekuperační brzdy v případě, že:

- dojde ke ztrátě napájecího napětí nebo ke zkratu mezi trakčním vedením a kolejnicí / zemí na stejném úseku napájeném z trakční napájecí stanice,*
- trakční vedení neabsorbuje energii,*
- síťové napětí je vyšší než U_{max} (viz EN 50163, 4.1). Pokud není zajištěna absorpce vrácené energie jinými spotřebiteli, musí být u drážních vozidel použity jiné brzdné systémy“*

Maximální napěťové úrovně vycházející z normy ČSN EN 50163 ed.2

Napájecí soustava	Maximální dovolené napětí
DC 3 kV	3900 V
AC 25 kV	29 kV

Tabulka č. 2 Maximální napěťové úrovně [14]

Z norem plyne, že je rekuperace zakázána. Především při vzniku zkratu na trakčním vedení, z důvodu ovlivnění trakční soustavy, a tím možnému prodloužení doby zkratu.

Na síti SŽDC převažují dva typy **trakčních systémů**, systém stejnosměrný 3kV a střídavý 25kV 50 Hz.

Stejnoseměrný systém je vybudován v severní a východní části České republiky a dále se používá například v Polsku, Španělsku nebo Itálii. Dle informací SŽDC se na území České republiky 1798 km tratí s tímto systémem napájení (2017) [5]. Napájecí úseky napájí dvě napájecí stanice, což přináší výhodu vyšší spolehlivosti a rovnoměrně rozložené zátěže. Nevýhodou jsou vysoké ztráty z důvodu velkých proudů v řádech tisíců ampér. Rekuperace umožňuje přítomnost spotřebitele, tedy poklesu napětí v síti.

Střídavý systém se nachází v jižní a západní části České republiky a také ve východní části Evropy nebo severní části Francie. V České republice se podle SŽDC nachází 1382 km tratí s napájením 25kV (2017). [5] Výhodou jsou nižší proudy v řádu stovek ampér a z toho vyplývající nižší ztráty. Nevýhodou střídavého napájení byla donedávna nemožnost rekuperovat, z důvodu složité indikace spotřebitele v síti. Problém byl vyřešen informováním strojvedoucího o povolení (zákazu) rekuperace. Tato informace závisí na proudu v trakčních transformovnách, který nesmí překročit kritickou hodnotu.

Hnací vozidla musí v první řadě odpovídat požadavkům UIC na rekuperaci. Dále pak podléhají nařízením TSI dle nařízení komise č. 1302/2014 o *technické specifikaci pro interoperabilitu subsystému kolejová vozidla – lokomotivy a kolejová vozidla pro přepravu osob železničního systému v Evropské unii*. Podle nařízení musí kolejová vozidla vybavená dynamickými brzdami splňovat tyto požadavky [10]:

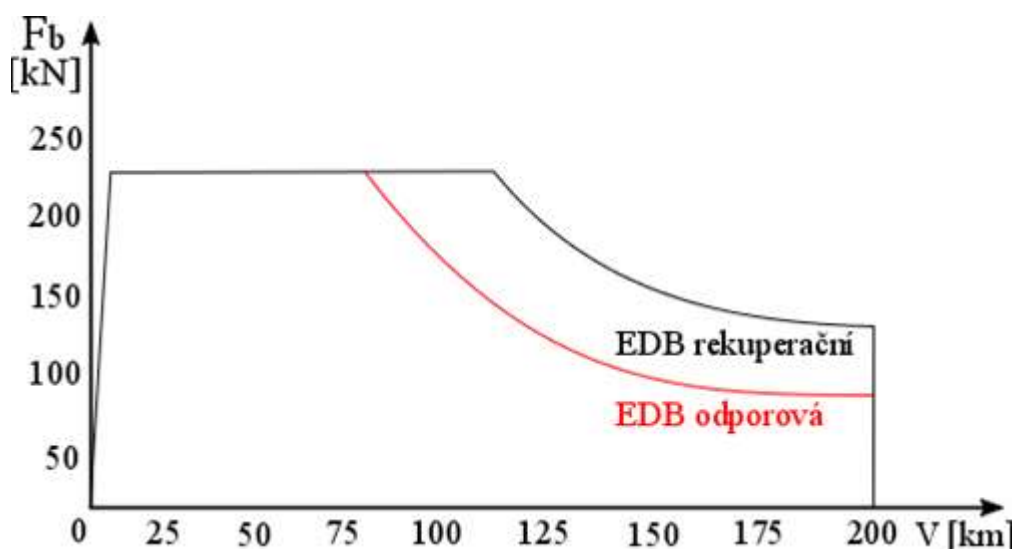
1. Musí být možné zabránit použití rekuperačního brzdění kolejových vozidel, tak aby nedocházelo k žádnému vracení energie do trolejového vedení při jízdě po trati, která to neumožňuje
2. Dynamickou brzdu lze používat nezávisle na ostatních brzdových systémech nebo společně s jinými brzdovými systémy
3. Pokud je dynamická brzda používána nezávisle na ostatních brzdových systémech, musí být možné omezit maximální hodnotu a míru změn dynamické brzděné síly předem definovanými hodnotami

Základ rekuperačního systému tvoří trakční motory pracující v režimu brzdy. Trakční motory jsou v dnešní době používány ve většině vozidel závislé i nezávislé trakce, výjimkou jsou jen historická vozidla, regionální motorové lokomotivy a speciální typy vozidel. Motory se dělí v závislosti na druhu dodaného proudu na motory stejnosměrné a střídavé.

Motory stejnosměrné bývají pro pohon kolejových vozidel používány už řadu let, a to hlavně z důvodu jednoduché konstrukce a snadné regulace. Motory napájené stejnosměrným proudem mohou být krátkodobě silně přetížené. Možnost přetížení motoru při rozjezdu je až 100 %. Limitní otáčky jsou potom asi 7000 min^{-1} . Je tedy nutné využít vícestupňovou převodovku. Mezi další nevýhody patří menší účinnost a nižší hustota výkonu než u motorů střídavých [3]. Při potřebě brzdění, začínají motory fungovat jako asynchronní generátory. Proud jimi vyrobený poté putuje přes střídač do kondenzátoru a, v případě přítomnosti spotřebitele (podpětí v síti) je vrácen zpět do TS. Pokud spotřebitel přítomen není, je přebytečná energie zmařena v brzdovém odporníku.

Motory střídavé, asynchronní jsou momentálně nepoužívanějším druhem pohonu nových hnacích vozidel na železnici. Výhodami jsou nižší náklady na údržbu, než u motorů stejnosměrných a mnohem vyšší poměr výkonu a hmotnosti. Otáčky se přitom mohou pohybovat až do hodnoty $20\,000 \text{ min}^{-1}$. Nevýhodou je potřeba řídit vstupní proud i jeho frekvenci a z toho důvodu je třeba zvolit technicky náročnější způsob regulace [3]. Princip elektrodynamické brzdy se podobá stejnosměrným systémům. Trakční motory fungují jako generátory a proud, který vyrobí poté vrátí do TS. I zde jsou při přebytku energie použity brzdové odporníky.

Elektrodynamické brzdy, zkráceně EDB jsou obvykle trakční motory, které po přepnutí režimu pracují jako generátor. Získaná elektrická energie může být v brzdových odpornících převedena na teplo, vrácena zpět do TS, nebo akumulována v zásobnících ve vozidle. Charakteristický průběh EDB znázorňuje obrázek č. 3, červená čára představuje brzdění do odporníků, které není možné z důvodu chlazení aplikovat po delší dobu. Z důvodu nízké účinnosti v nízkých a velmi vysokých rychlostech, jsou brzdové systémy HV vždy doplněny o klasické třecí brzdy.



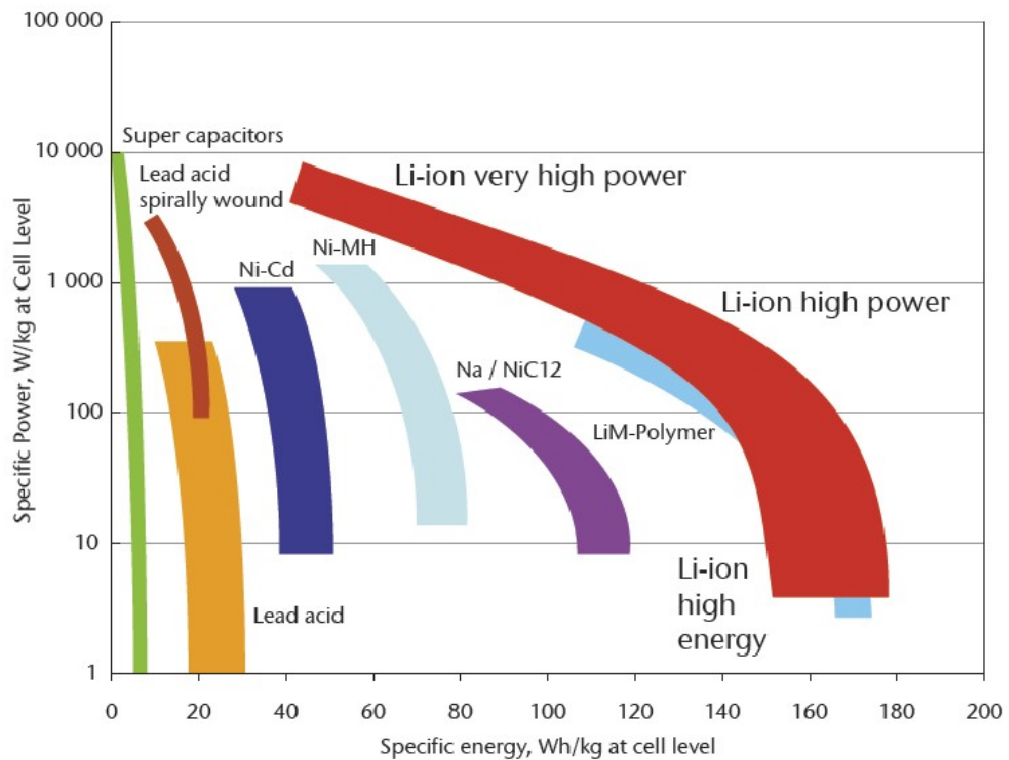
Obrázek č. 3 Průběh ED brzdy [6]

V případech, kdy není možné z různých důvodů vracet vyprodukovanou energii zpět do TS, je výhodné použít energetické zásobníky ve vozidlech. **Zásobníky energie** jsou rozděleny v závislosti na typu energie, kterou uchovávají. Například energii mechanickou, chemickou nebo elektrickou. Indikátory charakterizující jednotlivé typy zásobníků jsou:

1. poměr uložené energie a hmotnosti, značíme E [Wh/kg]
2. poměr maximálního výkonu, který je zásobník schopen dodat, a hmotnosti. Značíme P [W/kg].

Typ zásobníku	E [Wh/kg]
Zásobníky stlačeného vzduchu 31 MPa	137
Olověná baterie	30-50
NiMH baterie	70-120
Li-ion baterie	90-190
Superkapacitor	5
Setrvačnick	3
Nafta	11640

Tabulka č. 3 Porovnání energetických kapacit zásobníků [7]



Obrázek č. 4 Porovnání E a P zásobníku energie [8]

Základním parametrem u návrhu zásobníku je celková kapacita, která by měla být větší než maximální kinetická energie vlaku. Tabulka č. 4. znázorňuje poměrnou hmotnost akumulátorů při potřebě uchovat veškerou kinetickou energii vznikající během zastavení z různých rychlostí. Například použitím setrvačníku, by se hmotnost vlaku zvýšila o 14 %, naopak rozvoj baterií v poslední době přispěl ke zlepšení poměru výkonu a hmotnosti. Použití baterií typu Li-ion zvýší hmotnost vlaku asi o 0,36 %. Akumulátory mohou znamenat přínos, především při jízdách nižšími rychlostmi, u vozidel lehké stavby nebo vozidel nezávislé trakce. Tyto požadavky jsou splněny například u posunovacích lokomotiv nebo vozidel MHD.

V [km/h]	Ek [kWh/kg]	Pb baterie	Li-ion bat.	Super kap.	Setrvačník
0	0,00	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
20	0,00	0,0001	0,0000	0,0009	0,0014
40	0,02	0,0006	0,0001	0,0034	0,0057
60	0,04	0,0013	0,0003	0,0077	0,0129
80	0,07	0,0023	0,0006	0,0137	0,0229
100	0,11	0,0036	0,0009	0,0214	0,0357
120	0,15	0,0051	0,0013	0,0309	0,0514
140	0,21	0,0070	0,0018	0,0420	0,0700
160	0,27	0,0091	0,0023	0,0549	0,0914
180	0,35	0,0116	0,0029	0,0694	0,1157
200	0,43	0,0143	0,0036	0,0857	0,1429

Tabulka č. 4 Srovnání poměrných hmotností akumulátorů a brzdné rychlosti

2.2. Možnosti rekuperace

Rekuperace mezi vozidly

Jde o nejrozšířenější a na území České republiky prozatím jediný způsob rekuperace, používaný v běžném provozu. Při brzdění rekuperační EDB se vznikající energie přenáší trakčním vedením do jiného hnacího vozidla – spotřebitele, který ji spotřebuje. Výhoda rekuperace se nachází v možnosti jejího využití na většině elektrifikovaných tratí bez nutnosti velkých úprav. Nevýhody přináší rozdělení TS na jednotlivé napájecí úseky, které se z provozních a bezpečnostních důvodů napájí samostatně. Je tedy nutné zajistit, aby se zdroj i spotřebitel nacházeli ve stejném napájecím úseku.

Možným řešením, by bylo sloučení napájecích úseků především na vícekolejných tratích, kde jsou jednotlivé koleje napájeny samostatně. Dle vyjádření SŽDC z roku 2016, však propojení napájení jednotlivých kolejí představuje z provozního hlediska riziko. Při

možné poruše totiž dochází k výpadku napájení na celém propojeném úseku, a nejen na jedné koleji. Z tohoto důvodu SŽDC tuto možnost nepreferuje.

Dalším parametrem snižujícím celkovou účinnost je odpor trakčního vedení. Vodivé vlastnosti pro jednotlivé průřezy trakčního vedení uvádí norma ČSN EN 50149.

Průřez[mm ²]	80	100	107	120	150
Odpor [Ω/km]	0,229	0,183	0,171	0,153	0,122

Tabulka č. 5 Srovnání odporů vedení různých průřezů [15]

Pro výpočet úbytku napětí musíme znát výkon lokomotivy, typ napájecí soustavy, odpor trolejového vedení a vzdálenost na kterou je potřeba úbytek zjistit. Vzorec pro výpočet vychází ze základních vztahů používaných pro výpočet výkonu elektrických zařízení a odporu vodičů.

$$I = \frac{P}{U} \quad (12.)$$

I – proud [A]

P – výkon [W]

U – napětí [V]

$$\Delta U = I \cdot R$$

$$\Delta U = I \cdot R$$

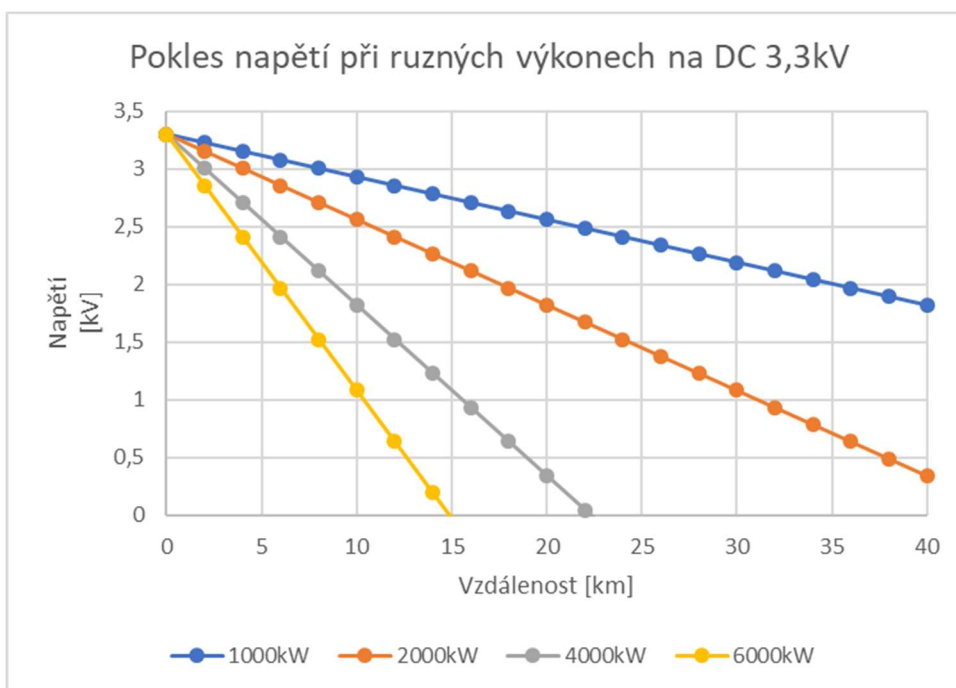
(13.)

ΔU – úbytek napětí [V]

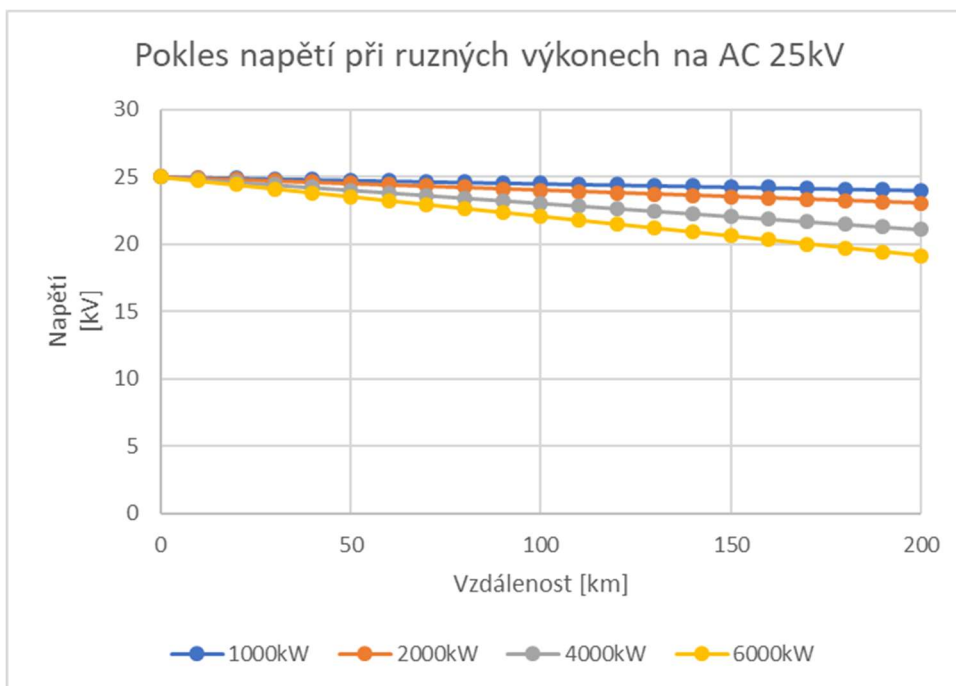
I – proud [A]

R – odpor [Ω]

V následujících grafech je znázorněn pokles napětí na soustavách DC 3,3kV a AC 25kV, pro různé výkony vozidel a průřez vodiče 150 mm².



Obrázek č. 5 Pokles napětí soustavy DC 3,3kV [Autor]



Obrázek č. 6 Pokles napětí soustavy DC AC 25kV [Autor]

Z grafů vyplývá, že pro zajištění vysoké účinnosti rekuperace, je nutné snížit vzdálenosti mezi zdrojem a spotřebitelem energie na minimum, především na síti DC 3,3 kV. Na základě naměřených odporů trakčních soustav jsou také stanoveny velikosti

koeficientů technických ztrát, jejichž hodnota ovlivňuje celkovou hodnotu energie účtované provozovatelem dopravy. Na základě smlouvy o dodávkách trakční energie jsou hodnoty těchto ztrát stanoveny na 18 % na soustavě DC a 9 % na soustavě AC. Obě smluvní strany se však zavázaly hodnoty upravit, pokud je jejich změna prokazatelná měřeními a výpočtem.

Rekuperace do stabilních zařízení

Systém je podobný jako při rekuperaci mezi vozidly s tím rozdílem, že spotřebitel energie není vozidlo, ale stabilní zařízení umístěné v blízkosti trati. V současné době není tento systém příliš rozšířen z důvodu nutných investic do akumulátorů podél trati a malé návratnosti pro investora, tedy SŽDC. Výhodou je pevná pozice spotřebitele například v místech častého brzdění vozidel a tím nízké ztráty vzniklé odporem TS. Uplatnění tohoto systému lze využít také na tratích s nízkou hustotou provozu.

Rekuperace se zpětným odkupem energie

Při odkupu energie dochází ke zpětnému vrácení nespotřebované energie do přenosové soustavy. Výhodou jsou nižší náklady na vybudování infrastruktury, nebo úpravu stávající infrastruktury narozdíl od stabilních akumulačních zařízení. Problémem je nezáměr dodavatelů o zpětný odkup energie a náročné měření energie vrácené jednotlivými vozidly. Tento systém by mohl být masově rozšířen při zavedení zákona podobného jako u zpětného odkupu energie z obnovitelných zdrojů.

Rekuperace do akumulátorů ve vozidle

Je jedinou možností rekuperace u vozidel nezávislé trakce. Výhodou jsou zanedbatelné ztráty při přenosu energie do akumulátorů a nezávislost na ostatních vozidlech a infrastruktuře. Je však nutné umístit zásobníky energie do hnacích nebo přípojných vozidel. Kapacita zásobníku by měla pojmout většinu kinetické energie vlaku, což v současných podmínkách znamená zvýšení hmotnosti vozidla o několik tun, viz tabulka č. 4.

2.3. Rekuperace při posunu

Posun je každý úmyslný pohyb drážních vozidel, pokud se nejedná o jízdu vlaku. Většinou probíhá v posunovacím obvodu stanice a řídí ho osoba způsobilá.

Posunovat můžeme následujícími způsoby:

1. Hnacím vozidlem – hnací vozidlo je po celou dobu jízdy svěřeno s taženými vozidly a řídí jejich rychlost
2. Odrazem – během jízdy se spřažená vozidla roztáhne, přední část jede na určenou kolej a zadní s připojeným hnacím vozidlem sníží rychlost. Tento cyklus se opakuje

3. Trhnutím – během jízdy se rozvěsí tažená vozidla, hnací vozidlo umístěno v čele přední části a řídí rychlost jízdy
4. Jízdou přes spádoviště – hnací vozidlo je umístěno na konci a sune tažená vozidla přes svážný pahrbek, v tomto místě jsou tažená vozidla rozvěšena, spád zvyšuje jejich rychlost a jsou směřována na jednotlivé koleje

Posun probíhá při nízkých rychlostech do 40 km/h s častými rozjezdy a brzděním, což je ideální pro použití. Navzdory nízké účinnosti EDB při těchto rychlostech jsou posunovací lokomotivy dnes běžně konstruovány jako hybridní nebo čistě bateriové. Akumulátorové lokomotivy limituje především dojezd a doba provozu v závislosti na kapacitě akumulátorů ve vozidle. Lokomotivy hybridní kombinují výhody čistě bateriových lokomotiv a lokomotiv motorových. Hlavní předností je možnost využití maximálního výkonu po delší dobu. Vzhledem k nedostatku reálných dat se však rekuperací při posunu v této práci zabývat nebudu.

2.4. Rekuperace při traťovém výkonu

Tento režim jízdy se vyznačuje vyššími rychlostmi a delšími dobami mezi zastávkami, než je tomu u posunu, a tím pádem vyšší účinnosti EDB. Z tohoto důvodu je dynamické brzdění a rekuperace běžnou součástí moderních hnacích vozidel. Brzdění lze rozdělit na dvě základní složky, ze kterých jsou vytvořeny různé strategie jízdy.

Brzdění spádové slouží k eliminaci gravitační složky tíhy vozidla s vozidlovým odporem, při jízdě na spádu [2]. Rekuperovaná energie je rovna změně polohové energie, zmenšená o odpory vozidel a trati, ale také o účinnost rekuperace.

Brzdění zpomalovací a zastavovací slouží ke změně pohybového stavu vozidla nebo ke snížení rychlosti či jeho zastavení [2]. Uložená energie se rovná změně kinetické energie, zmenšené o traťové a vozidlové odpory.

3. Návrh strategií jízdy vlaku z hlediska využití množství rekuperace

Při návrhu strategií jízdy vlaku bude hlavním požadavkem co nejvyšší úspora energie. Té lze dosáhnout snížením, nebo úplnou eliminací negativních faktorů, které do procesu vstupují. **Negativní faktory**, jimiž je rekuperace ovlivněna, vznikají v důsledku nedokonalosti materiálů, lidských chyb a nečekaných událostí na trati. Faktory lze rozlišit na:

- Předem známé s možným snížením negativních dopadů.
- Předem známé, u kterých nelze, nebo je velmi náročné snížit negativní dopady.

- Předem neznámé a je obtížné snižovat jejich dopady na účinnost rekuperace.

Největší úspora vzniká při omezení faktorů, které známe předem a je možné přizpůsobit provoz tak aby jejich negativní účinky byly co nejnižší. Patří zde odpory vozidel a trati, ztráty v trakčním vedení, účinnost dynamických brzd a plánované mimořádnosti na trati.

Mezi předem neznámé patří neplánované události na trati, lidské chyby a vlivy počasí. V případech, kdy je vlaková doprava organizována pro využití rekuperace mezi vozidly, je nutné, aby vlaky byly v místech plánované rekuperace v předem stanovený čas. Při zpoždění jednoho z vozidel je v daném okamžiku nedostupný buďto spotřebitel nebo zdroj a účinnost rekuperace se snižuje.

Vozidlové odpory jsou známy předem a jsou dány konstrukčním řešením vozidla, rychlostí a vliv má také hustota okolního prostředí. Je tedy možné snížit jejich negativní vlivy volbou jiného konstrukčního řešení s nižšími, například aerodynamickými odpory nebo snížením rychlosti vozidla. Odpory traťové jsou předem známé a je možné zajistit, aby v místech spádového brzdění byl vždy přítomen spotřebitel.

Zvýšit účinnost rekuperace lze tedy po provedení změn v organizaci dopravy, proškolení personálu a snahou o snížení neplánovaných mimořádností na tratích. Změny v plánování drážní dopravy se týkají míst na trati, kde dochází k současnému brzdění a rozjezdu dvou různých souprav, hovoříme o rekuperaci mezi vozidly při **zastavovacím brzdění**. Na více kolejných tratích v místech, kde spád převyšuje odpor vozidla a je nutné přebytečnou energii spotřebovat, hovoříme o **brzdění spádovém**.

Rekuperace mezi vozidly při zastavovacím brzdění slouží ke změně pohybového stavu vozidla neboli ke snížení rychlosti či jeho zastavení [2]. Uložená energie se rovná změně kinetické energie zmenšené o traťové a vozidlové odpory.

Z důvodu zjednodušení výpočtu se vlak nepohybuje ze spádu ani do stoupání, tudíž změna polohové energie je nulová a nehraje při výpočtu roli. Jinak je tomu u energie kinetické, která se mění se změnou rychlosti. Při běžném brzdění se snižuje rychlost vozidla a kinetická energie se přeměňuje na teplo v brzdách nebo brzdových odporcích. Část této energie je při rekuperaci získána, aby mohla být znovu použita. Dle **zákona o zachování energie** „*Při všech dějích v soustavě těles se mění jedna forma energie v jinou, nebo přechází energie z jednoho tělesa na druhé*“ [4]

$$E_k + E_p + E_d - A = 0 \quad (24.)$$

E_k – kinetická energie [J]

E_p – polohová energie [J]

E_d – energie dodaná, nebo vrácená do TS [J]

A – práce vykonaná odpory proti pohybu [J]

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 + \frac{1}{2} \cdot J_0 \cdot \omega^2 \quad (15.) [4]$$

E_k – kinetická energie [J]

m – hmotnost vozidla[kg]

v – rychlost vozidla [m/s]

J_0 – moment setrvačnosti rotujících hmot [kg·m²]

ω – úhlová rychlost rotujících hmot [s⁻¹]

Energie získaná brzděním vozidla je rovna změně kinetické energie snížené o práci vykonanou odpory proti pohybu.

$$E_d = \Delta E_k - O_C \cdot s \quad (16.)$$

E_d – energie získaná brzděním [J]

ΔE_k – změna kinetické energie [J]

O_C – odporová síla působící na vozidlo [N]

s – dráha [m]

$$E_d = \frac{1}{2} \cdot (m \cdot v^2 + J_0 \cdot \omega^2) - s \cdot (O_T + O_V + O_Z) \quad (17.)$$

E_k – kinetická energie [J]

m – hmotnost vozidla[kg]

v – rychlost vozidla [m/s]

J_0 – moment setrvačnosti rotujících hmot [kg·m²]

ω – úhlová rychlost rotujících hmot [s^{-1}]

s – dráha [m]

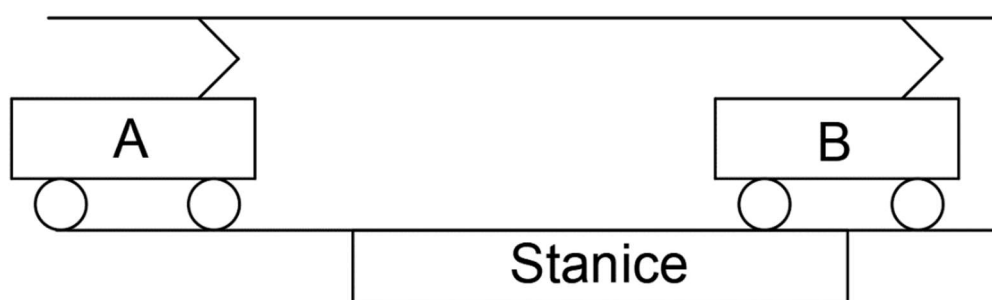
O_T – síla traťových odporů [N]

O_T – síla vozidlových odporů [N]

O_T – síla odporů ze zrychlení [N]

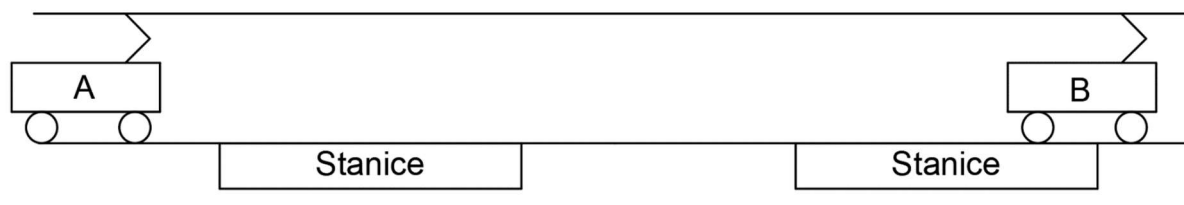
Hlavním přínosem tohoto druhu rekuperace je, že známe místo zastavení. A tak lze s předstihem najít spotřebitele v blízkosti rekuperujícího vozidla, a tím snížit ztráty při přenosu trakčním vedením. Při konstrukci grafikonu vlakové dopravy je potřeba zajistit, aby v dopravnách byla doprava cíleně organizována tak, že energii vzniklou brzděním vlaku přijíždějícího, okamžitě spotřebuje vlak odjíždějící. Takto rekuperovat je možné v několika strategiích, v závislosti na počtu stanic do strategie započítaných.

První z možností je případ, kdy první vlak odjíždí z dopravní, do které zároveň přijíždí vlak druhý. Hlavní výhodou této strategie, je přenos energie na krátké vzdálenosti, čímž se eliminují ztráty trakčního vedení.



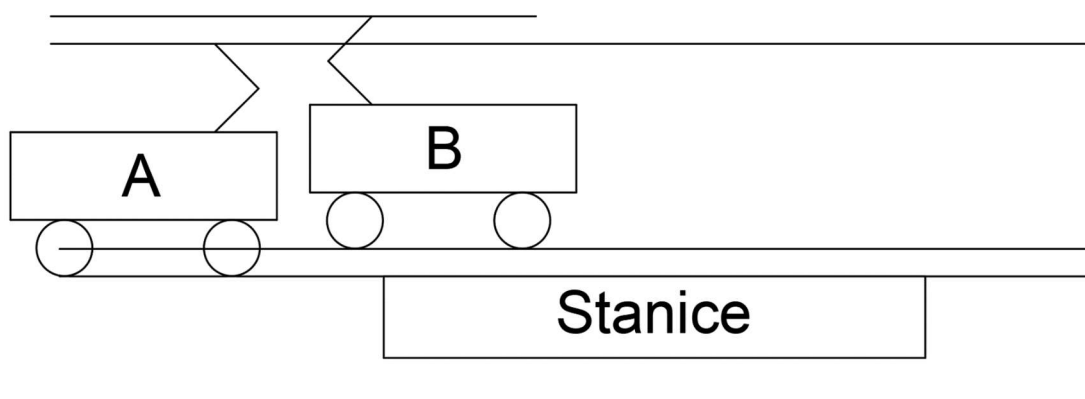
Obrázek č. 7 Rekuperace mezi vozidly v jedné dopravně [Autor]

V dalším případě dvě dopravní následují za sebou, jeden z vlaků zastavuje v přední dopravně a druhý odjíždí ze zadní dopravní. Výhodou této strategie je snazší organizace provozu a možnost využití na jednokolejných tratích. Nevýhodou je větší vzdálenost mezi vozidly, proto je strategie dvou stanic výhodná především v MHD a na soustavách s vyššími napětími.



Obrázek č. 8 Rekuperace mezi vozidly mezi více dopravami [Autor]

Poslední strategie se váže na více Kolejné trati, kde první vlak přijíždí do dopravní a druhý odjíždí z dopravní do opačného směru po jiné koleji. Výhodou je malá vzdálenost mezi vozidly, jelikož se během brždění/rozjíždění vozidla míjejí. Problémem je fakt, že jednotlivé dopravní koleje jsou z důvodu zvýšení bezpečnosti rozděleny do různých napájecích úseků.



Obrázek č. 9 Rekuperace mezi proti sobě jedoucimi vozidly [Autor]

Rekuperace mezi vozidly při spádovém brzdění slouží k eliminaci gravitační složky tíhy vozidla s vozidlovým odporem, při jízdě na spádu [2]. Získaná energie je rovna změně polohové energie, zmenšená o odpory vozidel a trati.

Při spádovém brzdění je rychlost vozidel považována za konstantní. Kinetická energie vlaku se nemění dle vztahu:

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad (18.)$$

E_k – kinetická energie [J]

m – hmotnost vozidla[kg]

v – rychlost vozidla [m/s]

Při jízdě ze spádu konstantní rychlostí, kdy se změna kinetické energie rovná nule a změna polohové energie je větší než práce vykonaná odpory proti pohybu, se množství rekuperované energie rovná rozdílu změny energie polohové a práce vykonané odpory dle této rovnice:

$$E_d = \Delta E_p - O_C \cdot s \quad (19.)$$

E_d – energie získaná brzděním [J]

ΔE_p – změna polohové energie [J]

O_C – odporová síla působící na vozidlo [N]

s – dráha [m]

Celkovou energii, kterou je možno využít při rekuperaci nebo ji při jízdě ze spádu přeměnit na teplo a následně nepoužít, lze získat takto:

$$E_d = m \cdot g \cdot \Delta h - s \cdot (O_T + O_V + O_Z) \quad (20.)$$

E_d – energie získaná brzděním [J]

m – hmotnost vozidel [kg]

g – tíhové zrychlení [m/s^2]

Δh – změna výšky [m]

s – dráha [m]

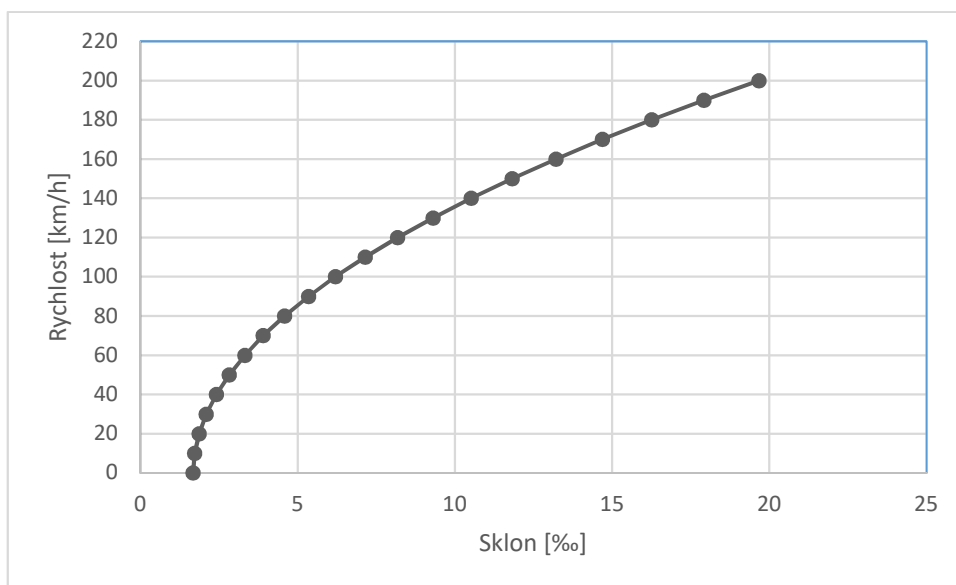
O_T – síla traťových odporů [N]

O_T – síla vozidlových odporů [N]

O_T – síla odporů ze zrychlení [N]

Množství energie získané tímto způsobem je nižší než při brzdění zastavovacím, z důvodu menších změn polohové energie oproti energii kinetické. Velké množství energie, vzniklé eliminací gravitační složky tíhy vozidla, je tak využito k překonání odporů proti pohybu. Následující graf zobrazuje spád potřebný k překonání vozidlových odporů při

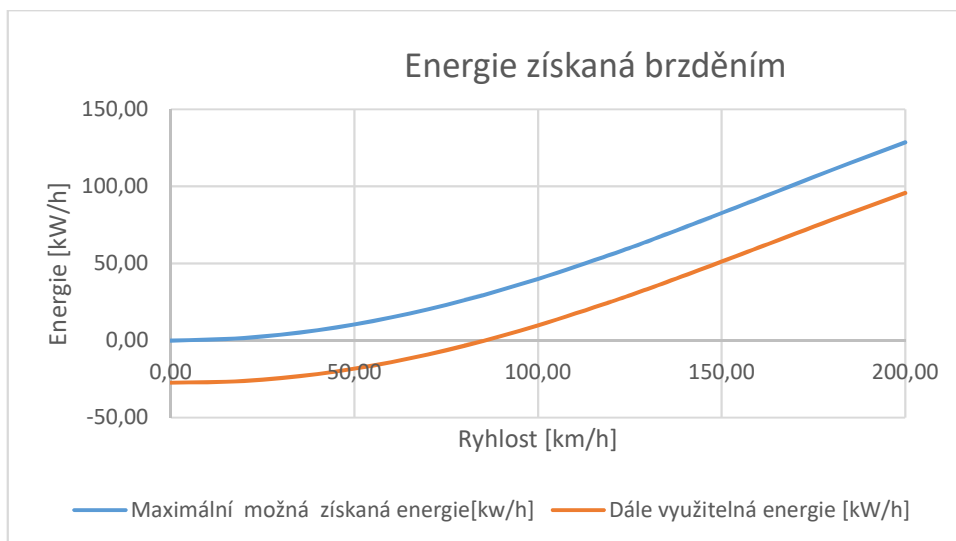
různých rychlostech. Například při rychlosti 160 km/h je spád potřebný k překonání vozidlových odporů 10‰, zpětné získání energie lze tedy až při spádu 10‰ a vyšším.



Obrázek č. 10 Spád potřebný k překonání vozidlových odporů

4. Výpočtové ověření úspory energie při rekuperaci pro navržené strategie

Množství energie, které lze získat **zastavovacím brzděním**, je závislé na hmotnosti a změně rychlosti vozidla. Část této se použije pro napájení pomocných systémů a pro napájení tažených vozidel. Zbývající energie je v případech, kdy není rekuperace povolena zmařena v brzdových odporcích nebo vrácena do TS. Pro zvýšení účinnosti rekuperace, je vhodné zbývající část energie uchovávat v akumulátorech a vhodně ji využít. Obrázek č. 13 vyjadřuje množství kinetické energie, kterou je možné získat při zastavení z různých rychlostí, modrou křivkou je vyjádřena celková hodnota energie E_c , oranžovou je znázorněná energie, kterou lze naměřit na sběrači, tedy část E_c , která nebyla využita pro napájení pomocných zařízení ani tažených vozidel.



Obrázek č. 11 Vliv rychlosti energií získanou brzděním

Největší traťová rychlost	t[s]	Ohv[N]	OTv[N]	Maximální možná úspora energie[kw/h]	Dále využitelná energie [kW/h]
0,00	0,00	2444,65	4065,75	0,00	-27,33
20,00	15,56	2741,50	4511,48	1,56	-26,32
40,00	31,11	3632,05	5752,29	6,25	-22,18
60,00	46,67	5116,31	7788,18	14,07	-14,92
80,00	62,22	7194,26	10619,15	25,01	-4,53
100,00	77,78	9865,92	14245,20	39,08	8,99
120,00	93,33	13131,27	18666,33	56,28	25,63
140,00	108,89	16990,33	23882,54	76,60	45,40
160,00	124,44	21443,09	29893,84	100,05	68,30
180,00	140,00	26489,55	36700,21	122,74	90,43
200,00	155,56	32129,71	44301,67	151,53	118,67

Tabulka č. 6 Dále využitelná energie z brzdění v závislosti na rychlosti

Na rozjezd stejného vlaku na rychlost 135 km/h se zrychlením $0,5 \text{ m/s}^2$ je přitom spotřebováno asi 94 kW/h. V následující tabulce je uvedena účinnost rekuperace, tj. poměr energie dodané pro rozjezd vlaku a energie získané zpět rekuperací. Část energie se vždy spotřebuje na provoz pomocných zařízení a připojených vozidel, zbývající energie může být v přítomnosti spotřebitele vrácena zpět do TS a znovu využita. Účinnost v případech, kdy není přítomen spotřebitel, znázorňuje poslední sloupec tabulky.

Rychlost vlaku	Energie získaná brzděním [kW/h]	Energie nevyužitá ve vlaku [kW/h]	Energie potřebná pro rozjezd [kW/h]	Maximální možná účinnost	Účinnost v nepřítomnosti spotřebitele
0,00	0,00	-27,33	0,00	0,00%	0,00%
20,00	1,70	-26,18	1,87	91,02%	91,02%
40,00	6,76	-21,68	7,53	89,72%	89,72%
60,00	15,01	-13,97	17,14	87,61%	87,61%
80,00	26,22	-3,32	30,93	84,76%	84,76%
100,00	40,02	9,93	49,28	81,21%	61,07%
120,00	55,97	25,32	72,62	77,07%	42,20%
135,00	69,01	37,95	93,74	73,62%	33,14%
160,00	92,00	60,24	136,61	67,34%	23,24%
180,00	110,67	78,37	178,66	61,94%	18,08%
200,00	128,68	95,83	228,52	56,31%	14,38%

Tabulka č. 7 Teoretická účinnost rekuperace při zastavovacím brzdění

Z tabulky vyplývá, že při rychlostech do 100 km/h nemá přítomnost spotřebitele nebo úložiště, vliv na účinnost rekuperace. Naopak při rychlostech vyšších má jeho přítomnost zásadní vliv na účinnost. Lze předpokládat, že v reálném provozu bude vždy celková účinnost nižší po započtení účinnosti EDB, účinnosti převodu elektrické energie na mechanickou a zpět a účinnosti přenosu elektrické energie mezi zdrojem a spotřebitelem.

Pro teoretický účinek **spádového brzdění** jsem do tabulkového procesoru zapsal hodnoty traťových poměrů na úseku mezi stanicemi Ostrava Svinov a Hranice na Moravě. Ze zapsaného sklonu a délky jednotlivých úseků jsem následně vypočetl změnu výšky, z této hodnoty dále změnu polohové energie vlaku neboli práci vykonanou traťovými odpory. Po započítání vozidlových odporů jsem získal celkovou hodnotu energie získané na traťovém úseku. Jak bylo naznačeno v předchozích kapitolách, energie získaná brzděním při jízdě ze spádu, je zanedbatelná. Na sledovaném úseku o délce 61,7 km byla maximální možná teoreticky získatelná energie jen 3,74 kW/h. Část výpočtu je uvedena v tabulce č. 8. Ve většině případů se energetický přírůstek spádového brzdění spotřebuje přímo ve vlaku a tím se ztrácí potřeba přenosu energie do jiných vozidel případně zásobníků energie.

i	Si	li	Změna výšky [m]	Změna polové energie [kJ]	Práce nutná k překonání odporů [kJ]	Celková E dodaná/vrác ená [kWh]
1	4,23	146	0,62	2 399	-5 208	2,113
2	5,15	900	4,64	18 006	-35 319	14,812
3	4,62	300	1,39	5 384	-11 155	4,594
4	4,97	254	1,26	4 904	-9 790	4,082
5	4	600	2,40	9 323	-20 866	8,386
6	3	500	1,50	5 827	-15 446	5,909
7	3,69	502	1,85	7 196	-16 853	6,680
8	-5,03	298	-1,50	-5 823	90	-1,643
9	-3,17	1200	-3,80	-14 778	-8 307	-1,797
10	-5,9	500	-2,95	-11 460	1 842	-3,695
11	-2,6	550	-1,43	-5 555	-5 025	-0,147
12	-4,47	1350	-6,03	-23 443	-2 527	-5,810
13	-2,7	1550	-4,19	-16 258	-13 560	-0,750
14	0	750	0,00	0	-14 428	4,008
15	0,35	1101	0,39	1 497	-22 677	6,715
16	-0,81	518	-0,42	-1 630	-8 335	1,862
17	-1,25	558	-0,70	-2 710	-8 025	1,476
18	-0,09	552	-0,05	-193	-10 426	2,842
19	-4,42	379	-1,68	-6 508	-783	-1,590
20	-2,88	962	-2,77	-10 763	-7 743	-0,839
21	-4,11	459	-1,89	-7 329	-1 501	-1,619
22	-1,15	1261	-1,45	-5 633	-18 624	3,609
23	-3,21	730	-2,34	-9 103	-4 940	-1,156
24	-5,02	247	-1,24	-4 817	65	-1,356
25	-3,49	347	-1,21	-4 705	-1 971	-0,759
26	-2,07	783	-1,62	-6 296	-8 766	0,686
27	-3,54	561	-1,99	-7 715	-3 077	-1,288
28	-3,02	2120	-6,40	-24 872	-15 911	-2,489
29	-0,19	292	-0,06	-216	-5 402	1,441
30	-2,61	431	-1,12	-4 370	-3 921	-0,125
31	-2,17	239	-0,52	-2 015	-2 583	0,158
32	-4	273	-1,09	-4 242	-1 010	-0,898
33	-1,72	800	-1,38	-5 345	-10 044	1,305
34	0,47	468	0,22	854	-9 857	2,976
35	-0,01	1701	-0,02	-66	-32 656	9,053
36	-1,62	500	-0,81	-3 147	-6 472	0,924
37	-2,56	851	-2,18	-8 463	-7 907	-0,154
38	-4,05	482	-1,95	-7 583	-1 689	-1,637

Tabulka č. 8 Úspora spádového brzdění na traťovém úseku

i – index úseku

Si – sklon i-tého úseku [‰]

li – délka i-tého úseku [m]

5. Praktické ověření úspory energie při použití rekuperace



Obrázek č. 12 Lokomotiva řady 380 [Autor]

Technické údaje	
Výrobce	ŠKODA Transportation
Tovární označení	109 E
Roky výroby	2008-2010
Vyrobena ks (5/2010)	3 / 20
Trakční systémy	3 kV=; 25 kV~50 Hz; 15 kV~16 2/3 Hz
Délka přes nárazníky	18 000 mm
Délka skříně	16 700 mm
Šířka	3080 mm
Výška se staženými sběrači	4 275 mm
Rozvor podvozku	2 500 mm
Vzdálenost otočných čepů	8 700 mm
Minimální poloměr oblouku	120 m
Uspořádání pojezdu	Bo'Bo'
Služební hmotnost	86 t
Průměr nových dvojkolí	1 250 mm
Průměr opotřeбенých dvojk.	1 170 mm
Rozchod	1 435 mm
Typ trakčních motorů	ML 4550 K/6
Max. fázový proud TM	647 A
Jmenovité napětí TM	1 130 V
Trvalá tažná síla	213 kN
Maximální tažná síla	274 kN
Maximální brzdná síla EDB	226 kN
Regulace výkonu	IGBT moduly
Trvalý výkon	6 400 kW
Maximální výkon	7 400 kW
Specifická hmotnost	13,4 kg/kW
Výkon EDB odporové	4 700 kW
Výkon EDB rekuperační	6 963 kW
Trvalá rychlost	102 km/h
Maximální rychlost	200 km/h

Obrázek č. 13 Technické údaje lokomotivy řady 380[9]

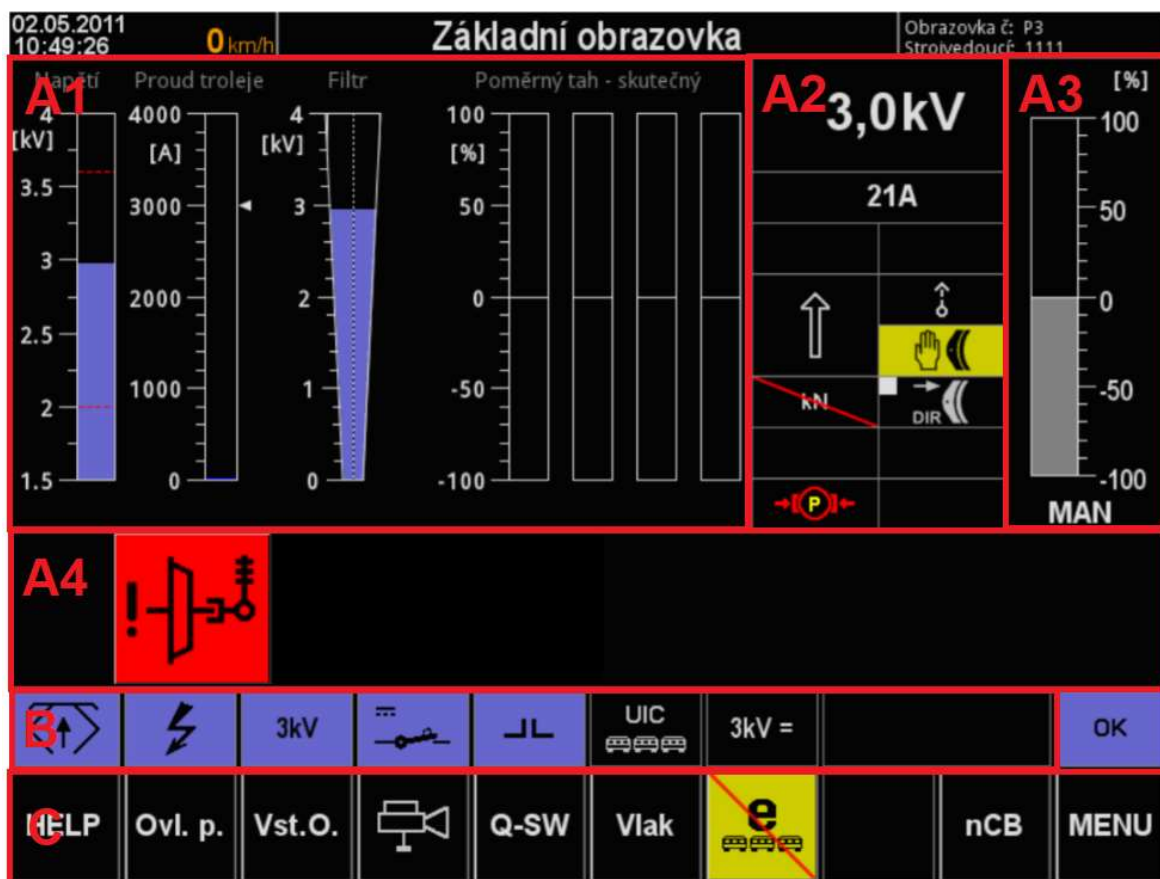
Pro praktické ověření úspory v **reálném provozu** jsem zpracoval data získaná z jízdy hnacího vozidla řady 380 s šesti připojenými šestinápravovými osobními vozy. Jízda vlaku je realizována na úseku trati ze stanice Ostrava-Svinov do stanice Otrokovice. Dle informací společnosti České dráhy vlak urazí celkem 107 km za 60 minut. Zastavuje přitom ve stanicích Hranice na Moravě, Přerov a Otrokovice.

Samotné získání dat proběhlo pomocí video nahrávky **obrazovky č. P3**, ta je v návodu k obsluze popsána jako *základní obrazovka sloužící k zobrazování informací o stavech lokomotivy*. A je rozdělena do těchto částí [11]:

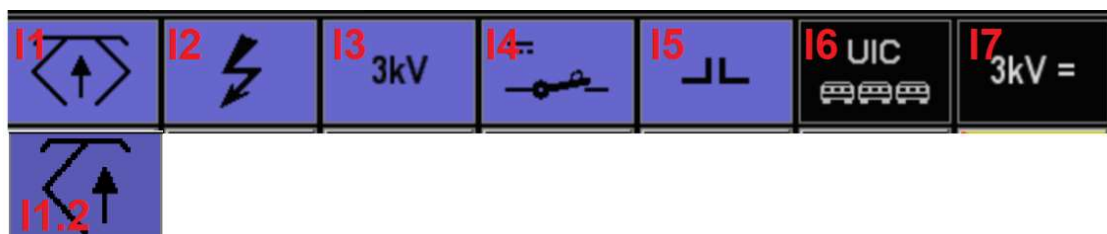
- A1 – Zobrazení skutečných hodnot
- A2 – Provozní indikátory
- A3 – Zobrazení požadavků
- A4 – Alarmy
- B – Indikátory stavů vysokého napětí
- C – Ovládací tlačítka

Rozložení těchto částí je zobrazeno na obrázku č. 12. Pro potřeby měření jsem využil pouze části A1, A2. Ostatní části obrazovky na výsledek nemají vliv, je však vhodné si uvést především význam indikátorů v části B, které se na obrazovce během záznamu objevují. Indikátory zobrazuje obrázek č. 13 a jejich význam je následující [11]:

- I1 – Oba sběrače nahoru
- I1.2 – Přední sběrač nahoru
- I2 – Napětí troleje v mezích
- I3 – Je nastaven trakční napájecí systém DC 3kV
- I4 – Stejnosměrný hlavní vypínač zapnut
- I5 – Stykače sepnuty
- I6 – Předvolen systém UIC elektrického napájení průběžného vedení
- I7 – Systém elektrického napájení průběžného vedení DC 3kV

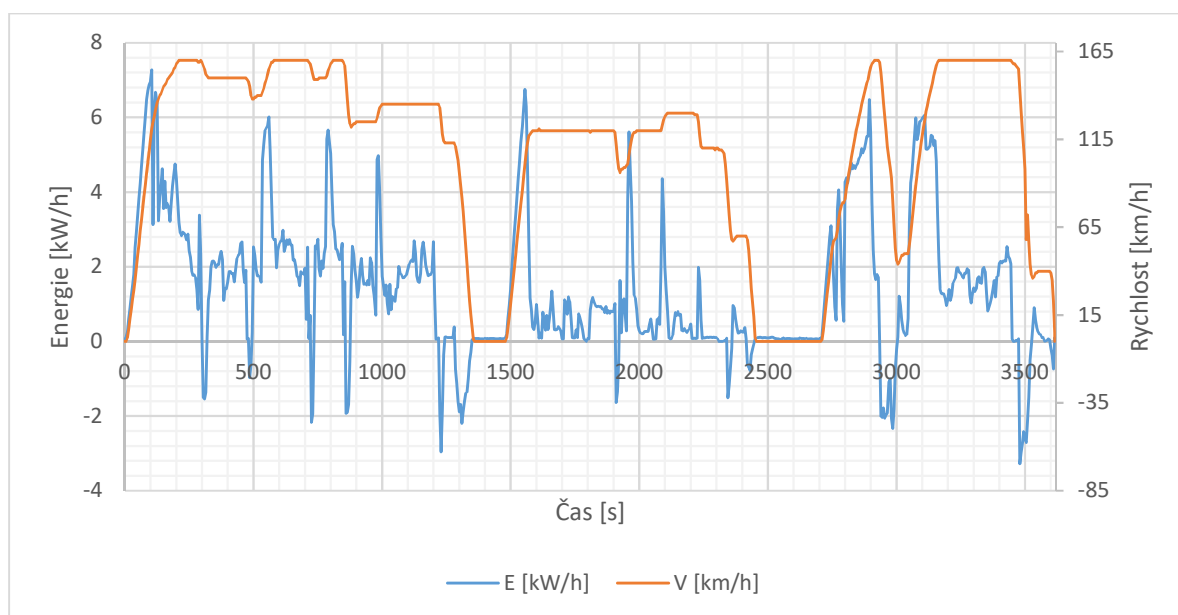


Obrázek č. 14 Základní obrazovka P3 [11]



Obrázek č. 15 Indikátory stavů vysokého napětí [11]

Pro potřeby výpočtů jsem do tabulkového procesoru Microsoft excel zaznamenal s intervalem 5 sekund hodnoty aktuální rychlosti, napětí na sběrači, proudu procházejícím sběračem a směr tahu motorů, tedy jestli se jedná jízdu tahem nebo brzdění. Z těchto informací jsem podle známých vzorců vypočítal průměrný výkon v časovém úseku a energii dodanou v časovém úseku. V případě brzdění pak průměrný brzdový výkon a energii vrácenou do TS během časového úseku. Z těchto dat jsem následně vytvořil graf rychlosti a energie procházející sběračem v závislosti na čase.



Obrázek č. 16 Graf energie spotřebované v časovém úseku a rychlosti

Veškerá energie získaná z EDB vznikla při změně kinetické energie, tedy při zpomalovacím (zastavovacím) brzdění. Jednotlivé brzděné úseky a jejich skutečné energetické přínosy uvádí tabulka č. 6.

Z grafu je patrné, že k zápornému toku energie, tedy k dodávání energie do trakční soustavy, dochází ve všech případech zároveň se snížením rychlosti. Takže se jedná o zastavovací brzdění, které bylo popsáno v předchozích kapitolách. Energetické přínosy jednotlivých brzděných úseků jsou podrobně zaznamenány v tabulce č. 6

i	V0[km/h]	V1[km/h]	ΔV [km/h]	E_z [kW/h]
1	157	152	5	-4,40
2	145	140	5	-1,59
3	155	152	3	-4,11
4	148	124	24	-6,04
5	133	114	19	-7,09
6	111	15	96	-17,30
7	112	98	14	-3,47
8	82	58	24	-3,56
9	58	14	44	-2,76
10	153	46	107	-21,02
11	143	38	105	-20,98
12	39	23	16	-1,30
Celkem				-93,61

Tabulka č. 7 Srovnání energetických zisků z brzděných úseků

i – index brzdění

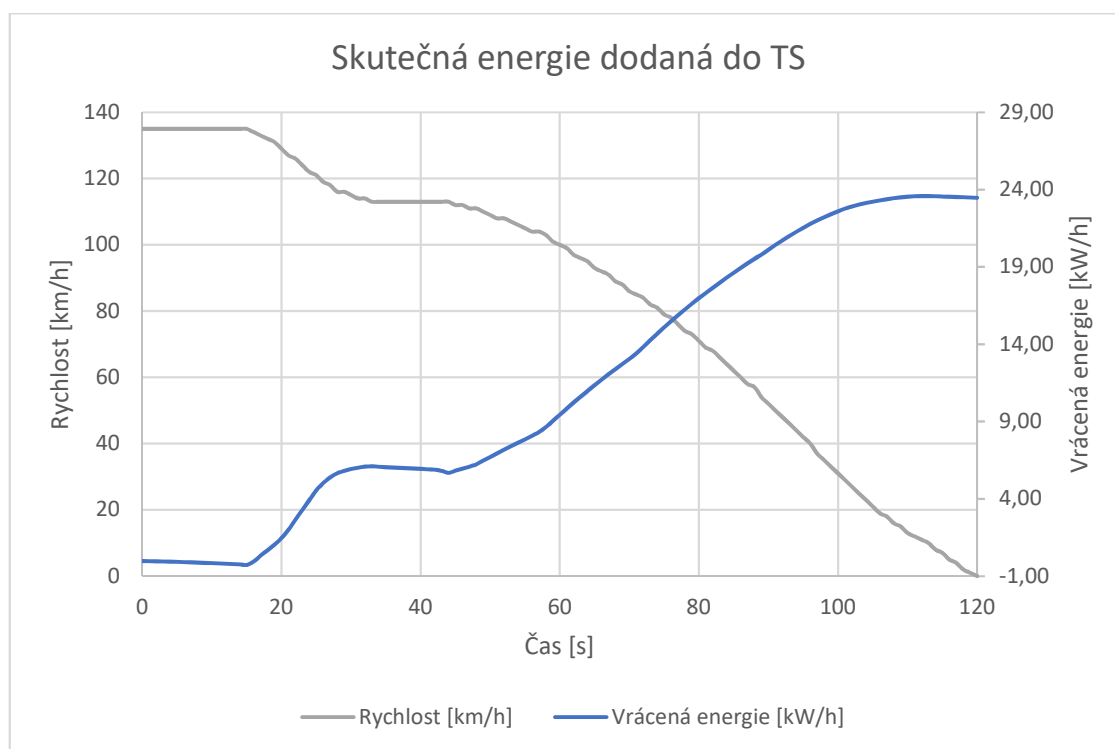
V0 – počáteční rychlost [km/h]

V1 – koncová rychlost [km/h]

ΔV – změna rychlosti [km/h]

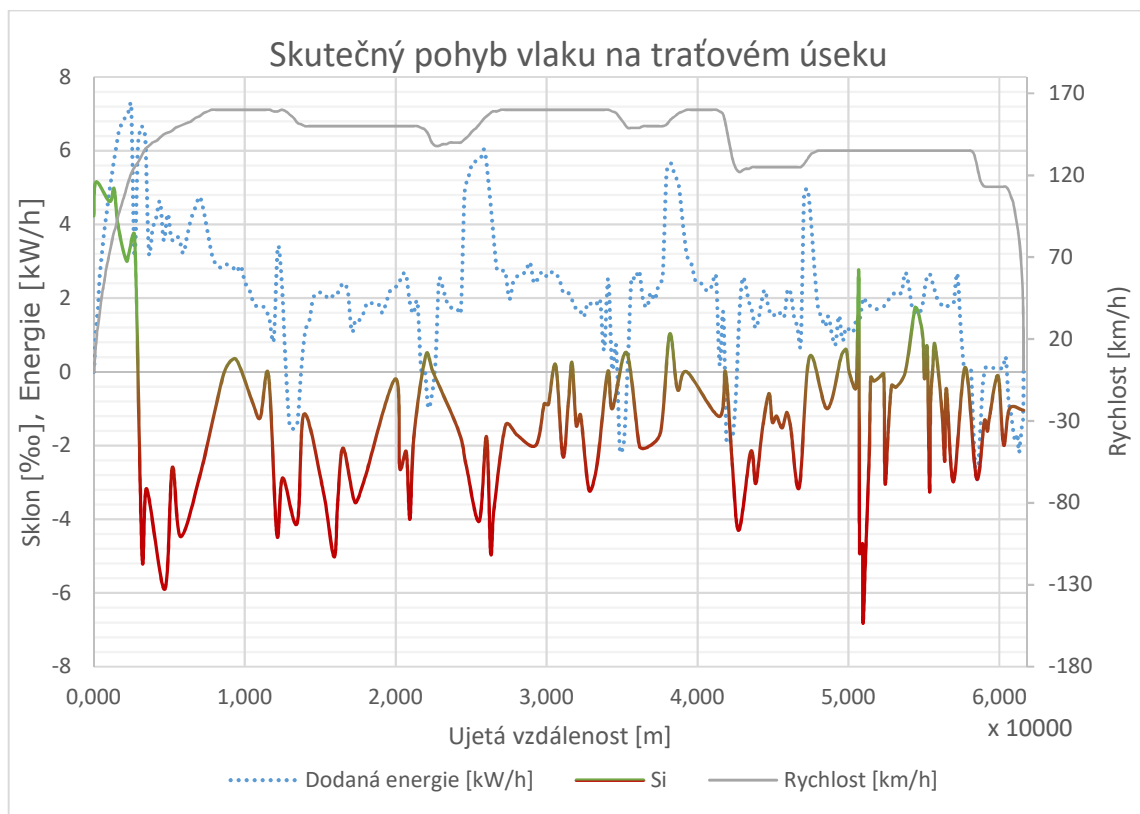
Ez – energie získaná brzděním [kW/h]

Část získaných dat, přesněji úsek obsahující brzdění vlaku do stanice Hranice na Moravě, jsem zpracoval podrobněji s krokem 1 sekunda a získanou energii jsem spolu s rychlostí zaznamenal do grafu. Viz obrázek č. 14. Z grafu je patrné, že s klesající rychlostí se snižuje účinek EDB, především z tohoto důvodu je reálně naměřená energie o asi 40 % nižší než energie zjištěná teoretickým výpočtem.



Obrázek č. 17 Energie získaná z reálného brzdění

Tvrzení, že tok energie je při spádovém brzdění kladný, tedy je potřeba dodávat energii hnacímu vozidlu, potvrzují i získaná reálná data. Na zpracovaném úseku trati, mezi stanicemi Ostrava Svinov a Hranice na Moravě, nebyl při kroku 5 sekund zaznamenán žádný okamžik, kdy by mohlo dojít k překročení rychlosti z důvodu velkého spádu. Z celkem 6 momentů, kdy byl na sběrači naměřen záporný tok energie – vracení energie do trakční soustavy. Ve všech případech bylo důvodem snížení rychlosti tedy brzdění zpomalovací. Z grafu je patrný i zanedbatelný vliv spádů a stoupání na spotřebovanou energii v poměru energií spotřebovanou na zvyšování rychlosti vlaku.



Obrázek č. 18 Sklonové poměry na trati, rychlost, energie

6. Provozně technické zhodnocení řešení

V současné době je rekuperace umožněna na většině elektrizovaných tratí na území České republiky, viz obrázek č. 20. Mezi traťové úseky, kde rekuperace povolena není, patří například část III. tranzitního železničního koridoru z Prahy k hraničnímu přechodu u Chebu. Dalším takovým je asi 42km trati na IV. tranzitním železničním koridoru mezi stanicemi Benešov u Prahy a Chotoviny. Oba tyto důležité úseky využívají střídavý systém napájení 25kV.

Dle informací z webu SŽDC je modernizace jednotlivých železničních koridorů jednou z priorit v oblasti **modernizace dráhy**. Přesně jsou zde uvedeny tyto body:

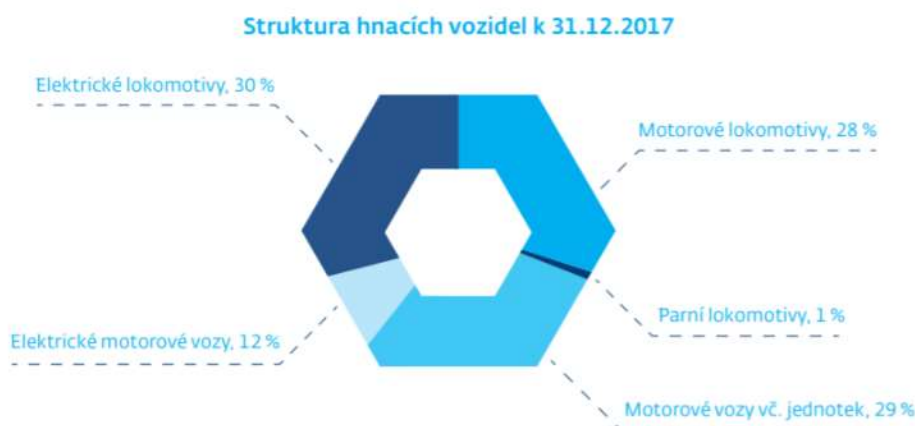
- Modernizace čtyř železničních koridorů
- Modernizace vybraných železničních uzlů
- Interoperabilita vybrané železniční sítě
- Pokračování elektrizace vybraných železničních tratí
- Regionální projekty
- Racionalizace vybraných tratí a železničních stanic
- Investice do majetku železniční dopravní cesty s cílem udržení její provozuschopnosti
- Zvýšení bezpečnosti na železničních přejezdech
- Výhledová příprava realizace vysokorychlostních tratí na území ČR s cílem napojení nejdůležitějších velkých aglomerací do evropského systému vysokorychlostních tratí

Z těchto priorit je v plánu investiční výstavby uvedena například příprava a zabezpečení staveb na III. a IV. železničním koridoru. Potřebná výstavba se plánuje a je otázkou času, kdy dojde ke změnám přímo ovlivňujícím rekuperaci a spotřebu energie kolejových vozidel.

Modernizace traťových úseků, tak aby rekuperaci umožňovaly, není jedinou možností, jak zvýšit podíl využití rekuperované energie. Další krok je na straně dopravců, ti mohou zvýšit konkurenceschopnost drážní dopravy nákupem moderních hnacích vozidel a jednotek, které rekuperaci umožňují a snižují tak náklady na trakční energii.

V současné době je největším Českým osobním dopravcem společnost **České dráhy**, která dle výroční zprávy SŽDC v roce 2017 zajistila 93,73 % vlakokilometrů. Dle statistické ročenky pro rok 2017 disponuje celkem 762 elektrickými lokomotivami a 172 elektrickými motorovými jednotkami. S dopravními výkony 82,101 Mil vlakokilometrů. Z těchto vozidel umožňuje rekuperaci jen asi 145 (zjištěno z neoficiálních volně

dostupných dat). Náklady na elektrickou trakční energii byly přitom v roce 2017 1,9 miliard korun. [12]



Obrázek č. 19 Struktura hnacích vozidel České dráhy [12]

V nákladní dopravě dominuje společnost **ČD Cargo** s 63,01 % podílu na vlakokilometrovém výkonu. Disponuje asi 245 elektrickými vozy. Za zmínku stojí 68 lokomotiv s obchodním označením Siemens Vectron, které společnost využívá přes finanční leasing, tyto dvousystémové lokomotivy rekuperaci umožňují. Investice společnosti v roce 2017 vedly také do vybavení hnacích vozidel měřáky spotřeby energie a paliva, jejichž využití při rekuperaci zvyhodňuje dopravce. Celkové náklady na trakční elektrickou energii byly v roce 2017 779 miliónů korun. [12]

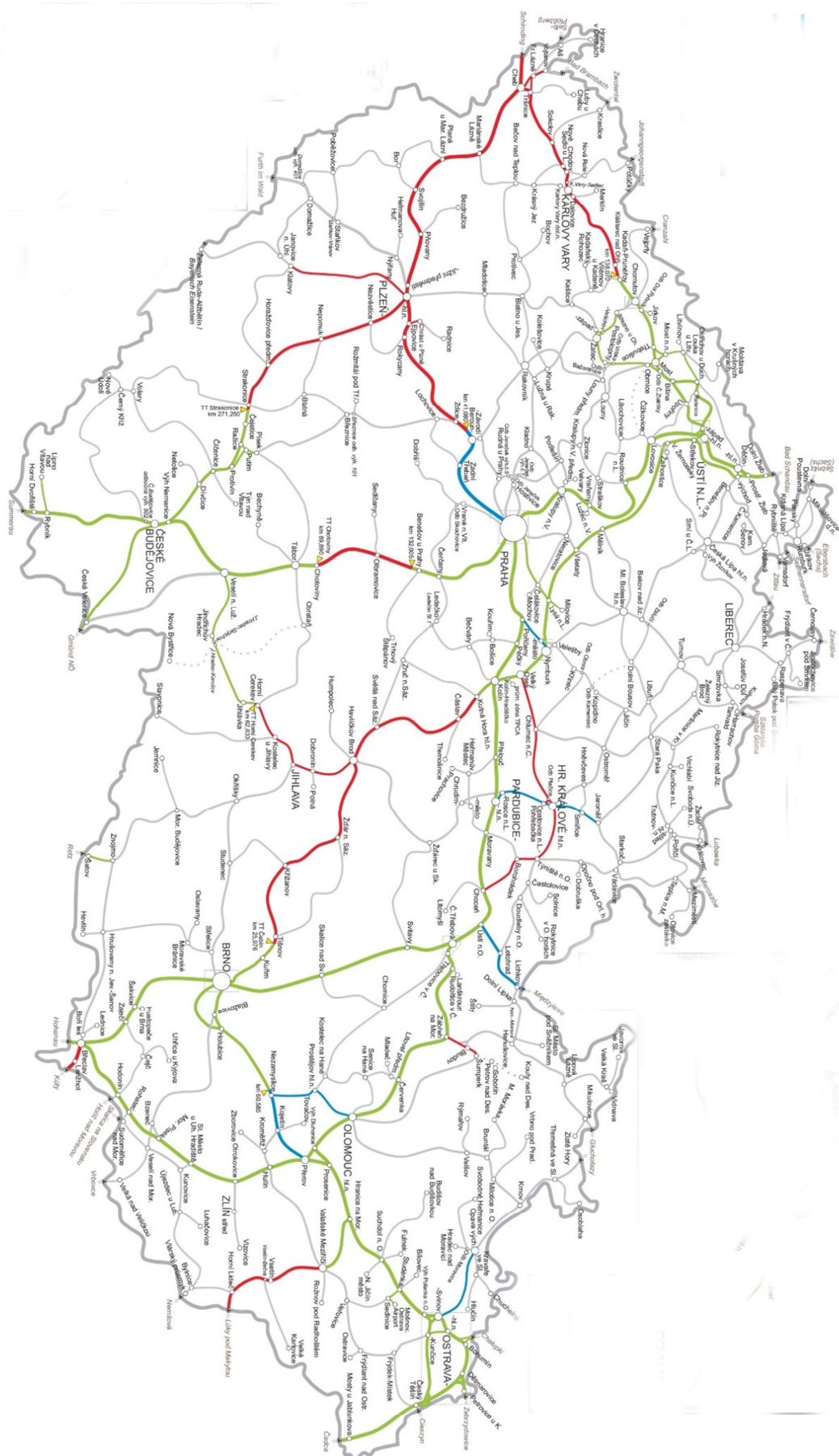
Jak už bylo popsáno dříve v této práci, spotřebovaná trakční energie je v současné době účtována pomocí **hybridního modelu rozúčtování**. Ten umožňuje dopravci používat jak vozidla vybavená EMS, tak vozidla bez EMS nebo s nefunkčním EMS. V závislosti na typu vlaku vstupujícího do hybridního modelu rozúčtování, je energie získaná rekuperací zaúčtována dopravci nebo propadá ve prospěch správce dráhy.

Typy vlaků dle smlouvy o dodávkách energie jsou následující:

1. Vlaky bez funkčního EMS
2. Vlaky s funkčním EMS
3. Vlaky s více hnacími vozidly a současně kombinací hnacích vozidel s EMS a bez EMS
4. Vlaky s nevalidními daty z EMS

Pokud u hnacích vozidel není možné dosáhnout hodnoty naměřené spotřeby trakční energie, je vlak vyhodnocen jako neměřený a spotřeba se vypočítává pomocí měrných spotřeb. V tomto případě není rekuperace započítána do energie vyúčtované dopravci, tento případ je tedy výhodný především pro provozovatele dráhy, kterému přináší finanční úspory.

V případě že jsou hnací vozidla vybavena funkčním EMS, je do měsíčního vyúčtování dopravci započtena i energie vrácená zpět do trakční soustavy. Finanční úspory jsou tedy na straně dopravce.



Obrázek č. 20 Úseky dovolující rekuperaci [5]

Závěr

V práci jsem zhodnotil možné energetické úspory při využívání rekuperace. Výsledek potvrzuje počáteční domněnky, že rekuperace přináší energetické úspory, jejichž velikost je závislá na různých parametrech jízdy a podmínkách na trati. Hlavní úsporu pak přináší brzdění zpomalovací, kde je na elektrickou energii převáděna energie kinetická. Při brzdění spádovém je úspora energie minimální a veškerou získanou energii spotřebuje provoz vlaku. V budoucnu by mohly stále větší vliv získávat lokomotivy hybridní a akumulátorové, které nedodávají rekuperovanou energii zpět do trakční soustavy a tím zvyšují účinnost rekuperace. V současné době by mohlo rekuperaci optimalizovat vhodným slučováním některých napájecích úseků a organizace dopravy s přihlédnutím na rekuperaci. Další úspory přináší také nákup nových hnacích vozidel a jednotek, které rekuperaci umožňují a modernizace tratí.

V současné době přináší rekuperace finanční úspory především dopravcům, kteří využívají hnací vozidla vybavené systémem EMS. A to ve formě zpětného výkupu rekuperované energie správcem dráhy.

Seznam použité literatury

- [1] ŠIROKÝ, Jaromír. *Mechanika v dopravě I: kolejová vozidla*. 1. vyd. Ostrava: VŠB – Technická univerzita, 2004, 121 s. ISBN 80-248-0536-7.
- [2] LEDNICKÝ, Denis. Maximalizace efektu rekuperačního brzdění. [online]. Praha, 2014 [cit. 2019-03-06]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/64105/F6-DP-2014-Lednický-Denis-DP%202014%20DL.pdf?sequence=-1>. Diplomová práce. ČVUT Praha.
- [3] HAJER, Václav. Rekuperace kinetické energie motorových vozidel [online]. Brno, 2009 [cit. 2019-03-06]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=17146. Bakalářská práce. VUT Brno.
- [4] REICHL, Jaroslav a Martin VŠETLIČKA. Encyklopedie fyziky [online]. [cit. 2019-02-13]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com>
- [5] SŽDC [online]. [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <https://www.szdc.cz/>
- [6] Educon [online]. [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <https://www.educon.zcu.cz>
- [7] KADHIM, Rafat. *Energy storage systems for railway applications* [online]. 2009 [cit. 2019-04-13]. Dostupné z: <https://www.dcstreetcar.com/wp-content/uploads/2014/08/Section-D-Part-1-1-280-pagesred.pdf>
- [8] ZIEMANN, S. The future of mobility and its critical raw materials. *Revue de Métallurgie* [online]. 2013, **2013**(1), 47-54 [cit. 2019-04-13]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/257984459_The_future_of_mobility_and_its_critical_raw_materials
- [9] *Atlas lokomotiv* [online]. [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <http://www.atlaslokomotiv.net>
- [10] NAŘÍZENÍ KOMISE (EU) č. 1302/2014: o technické specifikaci pro interoperabilitu subsystému kolejová vozidla – lokomotivy a kolejová vozidla pro přepravu osob železničního systému v Evropské unii [online]. 2014 [cit. 2019-05-08]. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:02014R1302-20180704&qid=1534488723573&from=CS>
- [11] ŠAFRÁNEK, Radek. *Návod k obsluze třísystemové elektrické lokomotivy ŠKODA 109E ČD 380*.
- [12] *Výročenky* [online]. [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <http://www.vyrocenky.cz/drazni>
- [13] ČSN EN 50388 *Drážní zařízení – Napájení a drážní vozidla – Technická kritéria pro koordinaci mezi napájením (napájecí stanicí) a drážními vozidly pro dosažení interoperability*. 2013.
- [14] ČSN EN 50163 ED.2 *Drážní zařízení - napájecí napětí trakčních soustav*. 2005.

[11] ČSN EN 50149. *Drážní zařízení - Pevná drážní zařízení - Elektrická trakce - Profilový trolejový vodič z mědi a slitin mědi.*